

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平5-245780

(43)公開日 平成5年(1993)9月24日

(51)Int.Cl.⁵

B 2 5 J 5/00

13/08

G 0 5 D 1/02

識別記号

E 9147-3F

C 9147-3F

Z

Z 7828-3H

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数7(全 29 頁)

(21)出願番号

特願平4-81381

(22)出願日

平成4年(1992)3月4日

(71)出願人 000005326

本田技研工業株式会社

東京都港区南青山二丁目1番1号

(72)発明者 吉野 龍太郎

埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会社
本田技術研究所内

(72)発明者 高橋 英男

埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会社
本田技術研究所内

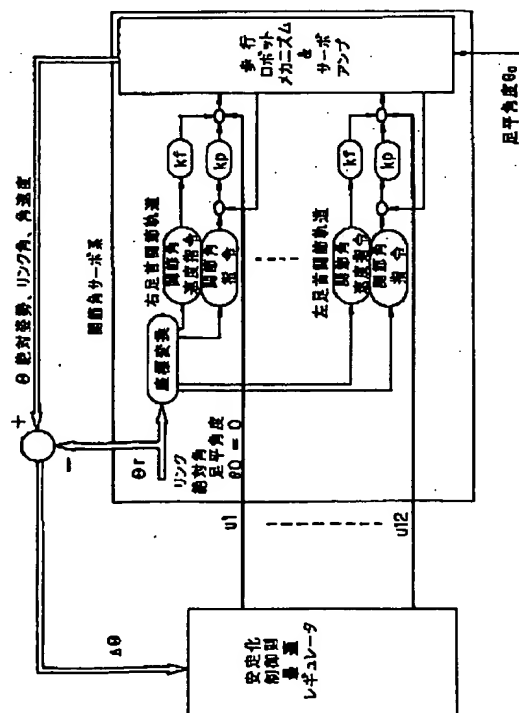
(74)代理人 弁理士 吉田 豊 (外1名)

(54)【発明の名称】 脚式移動ロボットの制御装置

(57)【要約】

【構成】 2足歩行の脚式移動ロボットの制御装置において、関節角サーボ系を備えると共に、予め設定した歩行パターンの目標角度と実際の角度との偏差を絶対角度で求め、それから第2の操作量を演算してサーボ系操作量に加算する。

【効果】 歩行パターンが予期しない凹凸路面に遭遇したときも転倒することなく、安定した姿勢を保持できる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 脚式移動ロボットの脚部リンクの各関節に配したサーボモータに所定の操作量を与え、各関節の角度を予め設定した目標角度に追従制御する制御装置において、

a. 前記脚部リンクの実角度と目標角度との偏差を重力方向に対する絶対角度で検出する検出手段、及び

b. 検出した偏差に応じ、それを補正すべく第2の操作量を演算する演算手段、とを備え、前記制御装置は、前記所定の操作量に演算された第2の操作量を加算した値を前記サーボモータに与える様にしたことを特徴とする脚式移動ロボットの制御装置。

【請求項2】 前記脚式移動ロボットが、基体と、それに連結される複数本の脚部リンクとからなるものにおいて、前記演算手段は、該基体の傾斜角及び／又は傾斜角速度から前記第2の操作量を演算することを特徴とする請求項1項記載の脚式移動ロボットの制御装置。

【請求項3】 前記脚式移動ロボットが、基体と、それに第1の関節を介して連結される2本の脚部リンクとからなり、該脚部リンクがその先端付近に第2の関節を備えたと共に、該第2の関節と前記第1の関節との間に第3の関節を備え、該2本の脚部リンクで交互に自重を支持しつつ歩行する2足歩行型のロボットであり、前記制御装置は、支持脚の第2関節、支持脚の第3関節、支持脚の第1関節、遊脚の第1関節、遊脚の第3関節、遊脚の第2関節の順に設けられた優先順位に少なくとも部分的に従って、前記所定の操作量に第2の操作量を加算することを特徴とする請求項1項または2項記載の脚式移動ロボットの制御装置。

【請求項4】 前記演算手段は前記第2の操作量を状態方程式を用いて演算すると共に、その状態フィードバックゲインを、前記角度から決定されるロボットの姿勢に応じて変えることを特徴とする請求項1項ないし3項のいずれかに記載の脚式移動ロボットの制御装置。

【請求項5】 前記脚式移動ロボットが、基体と、それに第1の関節を介して連結され、その先端付近に第2の関節を備えた2本の脚部リンクとからなり、該2本の脚部リンクで交互に自重を支持しつつ歩行する2足歩行型のロボットであり、該第2関節付近に遊脚に作用する外力を検出する手段を備え、前記演算手段は、検出された外力に基づいて前記第2の操作量を演算することを特徴とする請求項1項記載の脚式移動ロボットの制御装置。

【請求項6】 前記所定の操作量の算出においてフィードバック・ゲインをフィードバック信号の周波数特性に応じて可変とし、所定周波数を基準としてそれを超える帯域でのゲインをそれを下廻る帯域でのゲインより小さくしたことを特徴とする請求項1項乃至5項のいずれかに記載の脚式移動ロボットの制御装置。

【請求項7】 前記所定周波数を可搬重量に応じて可変とすることを特徴とする請求項6項記載の脚式移動ロボ

ットの制御装置。

【発明の詳細な説明】**【0001】**

【産業上の利用分野】 この発明は脚式移動ロボットの制御装置に関し、特に2足歩行の移動ロボットにおいて予期しない凹凸がある路面でも安定して歩行できる様にしたものに關する。

【0002】

【従来の技術】 基体と、それに連結される2本の脚部リンクとからなり、その2本の脚部リンクを交互に前方に振り出して着地させつつ歩行する人間型の2足歩行ロボットの場合、一般には平坦路を前提とする歩行パターンを予め設計しておき、それを関節角軌道に変換してその軌道に遅れなく追従する様にロボットの関節角を制御して歩行を実現している。既知の階段、斜面についても同様である。その例としては、例えば特開昭62-97006号公報記載の技術を挙げることができる。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】 しかしながら、この手法では路面に予期しない未知の凹凸がある場合、支持脚の足平（足部）の角度が、既知の路面を歩行するときの様に一定しないため、既知の路面を前提に設計した歩行パターンに従っては安定して歩行することができない場合が生じ、甚だしい場合には転倒してしまう。そこで未知の凹凸がある路面でも倒れずに安定して歩行させる手法の一つとして、歩行パターンで足平から上の姿勢を設計しておき、それに実際の姿勢を追従制御させることが考えられる。即ち、ロボットの関節角を制御するのではなく、支持脚の足平から上の各リンクの絶対角、換言すればロボットの重力方向に対する姿勢を制御することが考えられる。何故ならば、支持脚の足平がどのような角度であろうとも、それから上の姿勢が目標姿勢（倒れない姿勢）であれば、安定した歩行を確保することができるからである。その考え方を利用したものを本出願人は先に、特願平2-259839号（平成2年9月28日出願）で提案している。

【0004】 しかしながら、本出願人が提案した技術はロボットの運動を線形モデルで近似しているため、支持脚の膝相当部位の関節が極端に動く歩行パターンや歩幅が大きく線形性が損なわれる如き歩行パターンにおいても滑らかな歩行を実現するためには、マニピュレータで一般的に行われている様に、非線形性を補償する必要がある。しかし、非線形性を補償するにはロボットの制御装置に高速のコンピュータを搭載しなければならず、その様な高速のコンピュータは大型で重量も大きくなることから、その搭載は移動型のロボットにとって好ましいものではない。

【0005】 従って、この発明の目的は、予め設計しておいた歩行パターンに基づいてロボットの姿勢を制御しつつ、前記した線形性を損なう様な歩行パターンについ

ても高速コンピュータを用いた非線形補償を行うことなく滑らかな歩行を実現すると共に、予期せぬ凹凸に遭遇しても常に安定した姿勢を確保することができる様にした脚式移動ロボットの制御装置を提供することにある。

【0006】

【課題を解決するための手段】上記した課題を解決するためにこの発明は例えば請求項1項に示す如く、脚式移動ロボットの脚部リンクの各関節に配したサーボモータに所定の操作量を与え、各関節の角度を予め設定した目標角度に追従制御する制御装置において、前記脚部リンクの実角度と目標角度との偏差を重力方向に対する絶対角度で検出する検出手段、及び検出した偏差に応じ、それを補正すべく第2の操作量を演算する演算手段、とを備え、前記制御装置は、前記所定の操作量に演算された第2の操作量を加算して前記サーボモータに与える様に構成した。

【0007】

【作用】脚部リンクの実角度と目標角度との偏差を絶対角度で求め、それに応じて第2の操作量を演算して関節角サーボ系の操作量に足し込む様にしたので、凹凸のある路面を歩行するときも常に安定した歩行を確保することができる。また平坦路を歩行するときも含めて常に滑らかな姿勢制御を実現することができる。

【0008】

【実施例】以下、脚式移動ロボットとして2足歩行のロボットを例にとってこの発明の実施例を説明する。図1はそのロボット1を全体的に示す説明スケルトン図であり、左右それぞれの脚部リンク2に6個の関節(軸)を備える(理解の便宜のために各関節(軸)をそれを駆動する電動モータで例示する)。該6個の関節(軸)は上から順に、腰の脚部回旋用の関節(軸)10R、10L(右側をR、左側をLとする。以下同じ)、腰のピッチ方向(x方向)の関節(軸)12R、12L、同ロール方向(y方向)の関節(軸)14R、14L、膝部のピッチ方向の関節(軸)16R、16L、足首部のピッチ方向の関節(軸)18R、18L、同ロール方向の関節(軸)20R、20Lとなっており、その下部には足平(足部)22R、22Lが取着されると共に、最上位には胴体部(基体)24が設けられ、その内部には制御ユニット26が格納される。上記において股関節は関節(軸)10R(L)、12R(L)、14R(L)から構成され、また足関節は、関節(軸)18R(L)、20R(L)から構成される。また、股関節と膝関節との間は大腿リンク28R、28Lで、膝関節と足関節との間は大脚リンク30R、30Lで連結される。

【0009】ここで、脚部リンク2は左右の足についてそれぞれ6つの自由度を与えられ、歩行中にこれらの $6 \times 2 = 12$ 個の関節(軸)をそれぞれ適宜な角度に駆動することで、足全体に所望の動きを与えることができ、任意に3次元空間を歩行することができる様に構成され

る。先に述べた様に、上記した関節は電動モータからなり、更にはその出力を倍力する減速機などを備えるが、その詳細は先に本出願人が別途提案した出願(特願平1-324218号、特開平3-184782号)などに述べられており、それ自体はこの発明の要旨とするところではないので、これ以上の説明は省略する。

【0010】ここで、図1に示すロボット1において、足首部には公知の6軸力センサ36が設けられ、足平を介してロボットに伝達されるx、y、z方向の力成分 F_x 、 F_y 、 F_z とその方向回りのモーメント成分 M_x 、 M_y 、 M_z とを測定し、足部の着地の有無と支持脚に加わる力の大きさと方向とを検出する。また足平の四隅には公知の接地スイッチ38が設けられて、接地の有無を検出する。更に、胴体部24の上部には、一对の傾斜センサ40、42が設置され、x-z平面内のz軸に対する傾きとその角速度、同様にy-z平面内のz軸に対する傾きとその角速度を検出する。また、各関節の電動モータには、その回転量を検出するロータリエンコーダが設けられる(図1において足関節の電動モータ用のもののみを示す)。これらセンサ36などの出力は前記した胴体部24内の制御ユニット26に送られる。

【0011】図2は制御ユニット26の詳細を示すブロック図であり、マイクロ・コンピュータから構成される。そこにおいて傾斜センサ40、42などの出力はA/D変換器50でデジタル値に変換され、その出力はバス52を介してRAM54に送られる。また各電動モータに隣接して配置されるエンコーダの出力は可逆カウンタ56を介してRAM54内に入力されると共に、接地スイッチ38等の出力は波形整形回路62を経て同様にRAM54内に格納される。制御ユニット内には演算装置64が設けられており、ROM66に格納されている歩行パターンを読み込んで可逆カウンタ60から送出される実測値との偏差から電動モータの速度指令値を算出し、D/A変換器68を介してサーボアンプに送出する。また図示の如く、エンコーダ出力はF/V変換回路を介してサーボアンプに送出されており、図3に示す様にマイナーループとしての速度フィードバック制御が実現されている。

【0012】続いて、本制御装置の動作を説明する。

【0013】図3は図1に示したロボット1について、公知の関節角サーボ系を構成した場合を示すブロック図である。予めオフラインで設計しておいた平坦路を前提とする歩行パターンを12個の関節の角度 q_r 、角速度 \dot{q}_r ドットの時系列データ、即ち、関節軌道に変換し、それを各関節のサーボアンプに指令値として一定間隔で出力する。その結果、各関節角は指令値通りにほとんど遅れなく追従し、ロボット1は設計された歩行パターン通りに駆動されて歩行する。これによって平坦路は支障なく歩行するが、予期しない凹凸路面に遭遇したときは先に述べた如く、支持脚の足平の角度が一定ではないこ

とから、必ずしも安定した歩行を確保することはできない。

【0014】そこでこの発明においては図4に示す様に、図3に示した関節角サーボ系に、後で述べる操作量 u を加えて凹凸路面に対する安定化を試みた。以下、この操作量 u の算出とそれによる歩行安定化について説明する。

【0015】まず、図3の関節角サーボ系を備えたロボット1について数式モデルを作成する。その際に次に示す仮定を設ける。

〔仮定1〕ロボット1の前後方向の運動と左右方向の運動とは相互干渉が安定化制御により十分小さく、分離することができる。(図5に前後方向の、図6に左右方向の運動を示す。)

〔仮定2〕2本の脚部リンクのうちのどちらかの足平2は、路面に完全に接地しているものとする。また、足平が完全に路面に接地している方の脚を支持脚とする。

$$J(\Theta) \cdot \ddot{\Theta} + X(\Theta) \cdot \dot{\Theta}^2 + Z(\Theta) + Y(\Theta) \cdot F = M \cdot T$$

但し、 $\Theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$: ロボットのリンク角(姿勢)

$T = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$: 関節トルク

$F = (H, V)$: 遊脚に作用する外力

M : 定数行列

【0018】ところで、この制御においては図3に示す関節角サーボ系を備えることから、各関節(符号 i で表させる)の発生トルク(図3中のモータ発生トルク)は、関節角 q_i と関節角指令値 q_{ir} とから数2に示す式を用いて計算される。(尚、数2の式中の k_p, k

$$\tau_i = k_p \cdot (q_{ir} - q_i) + k_d \cdot \dot{q}_{ir} - f_v \cdot \dot{q}_i$$

【0020】ここで図5, 6に示す様に、関節角 q_i とリンク角 θ_i との関係は数3で表すことができる。尚、この明細書において、「関節角」または「 q 」はリンク間の角度(即ち、相対角度)を、「リンク角」または「 θ 」は重力方向に対する(絶対座標における)リンクの角度(即ち、絶対角度)を意味するものとして使用する。

〔仮定3〕支持脚の足平は、路面に対して動かない(滑らない)ものとする。(一般に歩行パターンは、片足支持期において支持脚の足平が路面に対して動かない様に設計する。例えば、いわゆるZMP(zero moment point)の概念を用いて、足平が路面から離れない様にZMPの軌道を決めて設計される。また倒立振り子の概念を用いた歩行パターンにおいても、足首回りで回転する場合には足平は物理的に路面から離れない。滑りに対しては、足裏にゴムを貼るなど適宜処理することにより滑らない様にすることは可能である。)

【0016】以上の仮定から、図1に示したロボット1の運動方程式は、数1の様に表すことができる。数1の式から明らかな様に、仮定3が成り立てば、ロボット1の運動は足平の角度に無関係である。

【0017】

【数1】

d, f_v は、図3中の k_p, k_d に k_v, k_c, k_t をそれぞれ含む値の意味で使用する。)

【0019】

【数2】

【0021】

【数3】

$$q_i = \theta_i - \theta_{i-1} \quad (i = 1 \sim n)$$

【0022】数2の式を数3の式によってリンク角で表してまとめると、数4に示す様になる。

【0023】

【数4】

$$T = K_r \cdot \theta_r + \dot{K}_r \cdot \dot{\theta}_r - F_p \cdot \theta - F_v \cdot \dot{\theta} - I_m \cdot \ddot{\theta} \\ + d(\theta_0, \theta_r)$$

但し、 K_r : 定数行列、 F_p 、 F_v : ゲイン行列、

I_m : モータの慣性モーメント行列、 θ_0 : 支持脚足平角度、

θ_{0r} : 支持脚足平目標角度、

θ_r 、 $\dot{\theta}_r$: 目標リンク角、角速度 (目標姿勢)

【0024】尚、数4の外乱 $d(\theta_0, \theta_{0r})$ 、即ち、足平角度 θ_0 の実際値と目標値とによって生じる値は数5の様に表示することができる。

$$d(\theta_0, \theta_{0r}) =$$

【0025】

【数5】

$$\begin{bmatrix} k_r \cdot \theta_{0r} - f_p \cdot \theta_0 + \dot{k}_r \cdot \dot{\theta}_{0r} - f_v \cdot \dot{\theta}_0 + n_1 \cdot I_m \cdot \ddot{\theta}_0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

【0026】ここで、数4の式を数1の式に代入して整理すると、数6の如くなる。

【0027】

【数6】

$$\begin{aligned} & (J(\theta) + M \cdot I_m) \cdot \ddot{\theta} + X(\theta) \cdot \dot{\theta}^2 + Z(\theta) \\ & + Y(\theta) \cdot F + M \cdot F_p \cdot \theta + M \cdot F_v \cdot \dot{\theta} \\ & + M \cdot d(\theta_{0r}, \theta_0) \\ & = M \cdot K_r \cdot \theta_r + M \cdot \dot{K}_r \cdot \dot{\theta}_r \end{aligned}$$

$$d(\theta_{0r}, \theta_0) = -d(\theta_0, \theta_{0r})$$

【0028】この数6に示す式が、関節角サーボ系によるロボットの運動方程式となる。数1の式では運動を制御する操作量は関節トルク T であるが、数6の式においては目標姿勢 θ_r (絶対角度)、 $\dot{\theta}_r$ (絶対角速度) となる。また数1の式では足平角度 θ_0 (絶対角度) の項が式の上に表れないが、数6の式では表れてくる。このため、関節角サーボ系で予期しない凹凸路を歩行させると足平角度 θ_0 がランダムに変動し、数6の式

の運動を乱す外乱となり歩行が不安定となる。よって、歩行可能な目標姿勢、即ち、歩行パターンは、仮定3より路面の形状を既知としてのみ設計することができる。ここで、平坦路の歩行を考えると、足平角度は零であることから、数7に示す様になる。

【0029】

【数7】

$$\theta_{0r} = 0, \dot{\theta}_{0r} = 0, \theta_0 = 0, \dot{\theta}_0 = 0, \ddot{\theta}_0 = 0、$$

$$d(\theta_{0r}, \theta_0) = 0$$

【0030】即ち、目標姿勢 θ_r 、 $\dot{\theta}_r$ は平坦路の歩行パターンとなる。このとき、ロボットの運動方程式 (数6の式) は、数8で表すことができる。

【0031】

【数8】

$$\begin{aligned}
 & (J(\theta) + M \cdot I_m) \cdot \ddot{\theta} + X(\theta) \cdot \dot{\theta}^2 + Z(\theta) + Y(\theta) \cdot F \\
 & + M \cdot F_p \cdot \theta + M \cdot F_v \cdot \dot{\theta} \\
 & = M \cdot K_r \cdot \theta_r + M \cdot \dot{K}_r \cdot \dot{\theta}_r
 \end{aligned}$$

【0032】一方、関節角サーボの定数 K_r などを最適な値に設定すると目標関節軌道に実際の関節軌道がほとんど遅れなく追従するので、数9で示す通りとなる。即

ち、数10で示す様になる。

【0033】

【数9】

$$\begin{aligned}
 \theta_1 & \approx \theta_{1r}, \quad \theta_2 - \theta_1 \approx \theta_{2r} - \theta_{1r}, \quad \dots \\
 , \quad \theta_6 - \theta_5 & \approx \theta_{6r} - \theta_{5r}
 \end{aligned}$$

【0034】

【数10】

$$\theta_1 \approx \theta_{1r}, \quad \theta_2 \approx \theta_{2r}, \quad \dots, \quad \theta_6 \approx \theta_{6r}$$

【0035】その結果、数8の式より近似的に数11の式が成り立つ。

【0036】

【数11】

$$\begin{aligned}
 & (J(\theta_r) + M \cdot I_m) \cdot \ddot{\theta}_r + X(\theta_r) \cdot \dot{\theta}_r^2 + Z(\theta_r) \\
 & + Y(\theta_r) \cdot F_r + M \cdot F_p \cdot \theta_r + M \cdot F_v \cdot \dot{\theta}_r \\
 & \approx M \cdot K_r \cdot \theta_r + M \cdot \dot{K}_r \cdot \dot{\theta}_r
 \end{aligned}$$

【0037】ここで、しばしば述べた様に、平坦路に未知の凹凸が存在する場合を考えると、足平角度 θ_0 が零ではなくて不明なため、歩行可能な歩行パターンを作成するのが困難である。そこで路面の凹凸が十分小さいとし（段差、階段などの大きい凹凸は前記したロボット1に視覚手段を設ければ検知し易い）、平坦路の歩行パターン θ_r を用いると（即ち、外乱 $d(\theta_r, \theta_0) = 0$ ）、凹凸による姿勢のズレ（偏差）を $\Delta\theta$ とすると、ロボットの姿勢 θ は数12の様に表すことができ

る。

【0038】

【数12】

$$\theta = \theta_r + \Delta\theta$$

【0039】従って、このズレを補正するために、数4の式の関節トルクに補正量 U を数13で示す式の様に導入する。

【0040】

【数13】

$$T = K_r \cdot \theta_r + \dot{K}_r \cdot \dot{\theta}_r - F_p \cdot \theta - F_v \cdot \dot{\theta} - I_m \cdot \ddot{\theta} + K_u \cdot U$$

$$\text{但し、} U = (u_1, u_2, \dots, u_n), \quad d(\theta_0, \theta_{0r}) = 0$$

【0041】この数13の式は平坦路の歩行における、即ち $(\theta_{0r}, \theta_0 = 0)$ の状態における関節角サーボ系による発生トルクに補正量 U を加えた形になっていることが分かる。

【0042】この補正量 U の算出について次に説明する。数12、数13の式をロボットの運動方程式である

数1の式に代入すると、数14の式となる。即ち、平坦路歩行パターン θ_r とズレ $\Delta\theta$ で表した運動方程式となる。

【0043】

【数14】

$$\begin{aligned}
& (J(\theta_r + \Delta\theta) + M \cdot I_m) \cdot (\ddot{\theta}_r + \Delta\ddot{\theta}) \\
& + X(\theta_r + \Delta\theta) \cdot (\dot{\theta}_r + \Delta\dot{\theta})^2 + Z(\theta_r + \Delta\theta) \\
& + Y(\theta_r + \Delta\theta) \cdot (F_r + \Delta F) + M \cdot F_p \cdot (\theta_r + \Delta\theta) \\
& + M \cdot F_v \cdot (\dot{\theta}_r + \Delta\dot{\theta}) \\
& = M \cdot K_r \cdot \theta_r + M \cdot \dot{K}_r \cdot \dot{\theta}_r + M \cdot K_u \cdot U
\end{aligned}$$

【0044】路面の凹凸が十分小さいとすると、ズレ $\Delta\theta$ も十分小さくなることから、数15の式の様に変形することができる。

【0045】

【数15】

$$\begin{aligned}
& (J(\theta_r) + (\partial J / \partial \theta) r \cdot \Delta\theta + M \cdot I_m) \cdot (\ddot{\theta}_r + \Delta\ddot{\theta}) \\
& + (X(\theta_r) + (\partial X / \partial \theta) r \cdot \Delta\theta) \cdot (\dot{\theta}_r + \Delta\dot{\theta})^2 \\
& + (Z(\theta_r) + (\partial Z / \partial \theta) r \cdot \Delta\theta) \\
& + (Y(\theta_r) + (\partial Y / \partial \theta) r \cdot \Delta\theta) \cdot (F_r + \Delta F) \\
& + M \cdot F_p \cdot (\theta_r + \Delta\theta) + M \cdot F_v \cdot (\dot{\theta}_r + \Delta\dot{\theta}) \\
& = M \cdot K_r \cdot \theta_r + M \cdot \dot{K}_r \cdot \dot{\theta}_r + M \cdot K_u \cdot U
\end{aligned}$$

但し、 $(\partial J / \partial \theta) r$ 、 $(\partial X / \partial \theta) r$ 、 $(\partial Z / \partial \theta) r$ 、

$(\partial Y / \partial \theta) r$: $\theta = \theta_r$ での偏微分値

【0046】ここで、ズレ $\Delta\theta$ の2次以上の項を無視すると、数16の式となる。

【0047】

【数16】

$$\begin{aligned}
& (J(\theta_r) + M \cdot I_m) \cdot \ddot{\theta}_r + X(\theta_r) \cdot \dot{\theta}_r^2 + Z(\theta_r) \\
& + Y(\theta_r) \cdot F_r + M \cdot F_p \cdot \theta_r + M \cdot F_v \cdot \dot{\theta}_r \\
& + (J(\theta_r) + M \cdot I_m) \cdot \Delta\ddot{\theta} + (\partial J / \partial \theta) r \cdot \ddot{\theta}_r \cdot \Delta\theta \\
& + 2X(\theta_r) \cdot \dot{\theta}_r \cdot \Delta\dot{\theta} + (\partial X / \partial \theta) r \cdot \dot{\theta}_r^2 \cdot \Delta\theta \\
& + (\partial Z / \partial \theta) r \cdot \Delta\theta + M \cdot F_p \cdot \Delta\theta + M \cdot F_v \cdot \Delta\dot{\theta} \\
& + (\partial Y / \partial \theta) r \cdot F_r \cdot \Delta\theta + Y(\theta_r) \cdot \Delta F \\
& = M \cdot K_r \cdot \theta_r + M \cdot \dot{K}_r \cdot \dot{\theta}_r + M \cdot K_u \cdot U
\end{aligned}$$

【0048】関節角サーボが高速に追従するとき成立する数11に示した式より、数16の式は近似的に数17に示す様になる。

【0049】

【数17】

$$\begin{aligned}
& (J(\theta r) + M \cdot I_m) \cdot \Delta \ddot{\theta} \\
& + (2X(\theta r) \cdot \dot{\theta} r + M \cdot F_v) \cdot \Delta \dot{\theta} \\
& + ((\partial J / \partial \theta) r \cdot \ddot{\theta} r + (\partial X / \partial \theta) r \cdot \dot{\theta} r^2 \\
& + (\partial Z / \partial \theta) r + (\partial Y / \partial \theta) r \cdot F_r + M \cdot F_p) \cdot \Delta \theta \\
& + Y(\theta r) \cdot \Delta F \\
& = M \cdot K_u \cdot U
\end{aligned}$$

【0050】さらに、 $J(\theta r)$ は θ による変化が小さいこと、 $X(\theta r)$ は値が小さいこと、関節角サーボのゲイン F_p , F_v の値が大きいことから、数18に示す

$$2X(\theta r) \cdot \dot{\theta} r \ll M \cdot F_v$$

$$\begin{aligned}
& (\partial J / \partial \theta) r \cdot \ddot{\theta} r + (\partial X / \partial \theta) r \cdot \dot{\theta} r^2 \\
& \ll (\partial Z / \partial \theta) r + M \cdot F_p
\end{aligned}$$

【0052】よって、数17の式は数19の様に表すことができる。

$$\begin{aligned}
& (J(\theta r) + M \cdot I_m) \cdot \Delta \ddot{\theta} + M \cdot F_v \cdot \Delta \dot{\theta} \\
& + ((\partial Z / \partial \theta) r + (\partial Y / \partial \theta) r \cdot F_r + M \cdot F_p) \cdot \Delta \theta \\
& + Y(\theta r) \cdot \Delta F \\
& = M \cdot K_u \cdot U
\end{aligned}$$

【0054】即ち、数19の式は歩行パターンからのズレ $\Delta \theta$ に対する運動方程式を表し、安定化のための補正量 U はそのズレ $\Delta \theta$ の運動を制御する操作量となっている。よって、ズレ $\Delta \theta$ を零にする操作量 U を導き出せば、凹凸のある路面であってもロボットの姿勢は平坦路の歩行パターンに収束するため、安定して歩行することになる。

$$U = U_\theta + (M \cdot K_u)^{-1} \cdot Y(\theta r) \cdot \Delta F$$

【0057】数20の式を数19の式に代入すると、数21の如くとなる。

$$\begin{aligned}
& (J(\theta r) + M \cdot I_m) \cdot \Delta \ddot{\theta} + M \cdot F_v \cdot \Delta \dot{\theta} \\
& + ((\partial Z / \partial \theta) r + (\partial Y / \partial \theta) r \cdot F_r + M \cdot F_p) \cdot \Delta \theta \\
& = M \cdot K_u \cdot U_\theta
\end{aligned}$$

【0059】従って、 U を数20の式を用いて計算すれば、数21の式はズレ $\Delta \theta$ に関する線形方程式となり、また最適に制御値を決定することができる。ただし、外力変動分 ΔF が十分小さく、数21の式において外乱とみなすことができるならば、 $\Delta F \approx 0$ とし、数20の式の第2項を計算することなく以下の操作量 U_θ を算出することによっても、ある程度の安定化は可能である。これは例えば、片足支持期では遊脚に外力が作用しないた

様な大小関係が成り立つ。

【0051】

【数18】

【0053】

【数19】

【0055】次に、ズレ $\Delta \theta$ を零にする操作量 U の算出について説明する。ここで操作量 U を数20の様に表してみる。ここで、 ΔF は遊脚に作用する外力の変動分であるが、これは前記した6軸力センサ36から検出することができる。

【0056】

【数20】

【0058】

【数21】

め $\Delta F \approx 0$ とできる様な場合である。

【0060】以下、その操作量 U_θ の算出について説明する。

【0061】数21の式は $\Delta \theta$ に関する線形方程式であるから、いわゆる状態方程式表現を用いて数22の様に表すことができる。

【0062】

【数22】

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u$$

$$y = C \cdot x$$

$$x = (\Delta \theta 1, \Delta \theta 2, \dots, \Delta \theta n, \dot{\Delta \theta 1}, \dot{\Delta \theta 2}, \dots, \dot{\Delta \theta n})^t$$

$$u = (u 1, u 2, \dots, u n)^t = U \theta$$

$$y = (\Delta \theta 1, \Delta \theta 2, \dots, \Delta \theta n)^t$$

【0063】ここで、最適レギュレータ理論により、数23の式に示す2次形式の評価関数Jを最小にするuは数24の様に表現することができる。

【0064】

【数23】

$$J = \int_0^{\infty} (x^t Q x + u^t R u) dt$$

【0065】

【数24】

$$u = -K x \cdot x$$

【0066】評価関数Jを最小にすることは、数23の式から明らかな様に、できるだけ少ない操作量uで状態変数xをできるだけ小さくすることである。即ち、路面の凹凸によるズレ $\Delta \theta$ をできるだけ小さくすることになる。よって、数24の式から補正量（操作量）uを計算することにより、安定な歩行が実現できることになる。

【0067】一方、外力変動 ΔF やマトリックスA、Bのモデル化誤差を外乱dと考えると、数22に示した式は、数25の様に表すことができる。

【0068】

【数25】

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u + d$$

$$y = C \cdot x$$

【0069】また、最適レギュレータ理論によれば、数26に示す2次形式の評価関数Jを最小にするuは数27の様に計算することができる。

【0070】

【数26】

$$J = \int_0^{\infty} (y^t Q y + \dot{u}^t R \dot{u}) dt$$

【0071】

【数27】

$$u = -K x \cdot x + K i \cdot \int_0^{\infty} y dt$$

【0072】数27の式も、数24の式と同様に、安定な歩行を実現する補正量（操作量）uの算出手法である。

【0073】ここで、uを計算するためにはゲインK

x, Kiとロボットの状態量xとを求める必要があるが、ゲインKx, Kiは、周知の如く、最適レギュレータ理論によりリカッチ方程式を解くことで求められる。また状態量xはリンクの角度と角速度であるが、これはロボットの胴体部24に取りつけた傾斜センサ40, 42と各関節に配置したロータリエンコーダにより求めることができる。よって、例えば前後方向の運動の場合、数3の式は数28の様に書くことができる。

【0074】

【数28】

$$q 1 = \theta 1 - \theta 0$$

$$q 2 = \theta 2 - \theta 1$$

$$q 3 = \theta 3 - \theta 2$$

$$q 4 = \theta 4 - \theta 3$$

$$q 5 = \theta 5 - \theta 4$$

$$q 6 = \theta 6 - \theta 5$$

【0075】ここで、胴体部（基体）24の傾斜角 $\theta 3$ は傾斜センサ40, 42で検出できることから、この検出値を ϕ とすると、関節角qiを用いれば、数28の式より数29の式が成り立つ。

【0076】

【数29】

$$\theta 3 = \phi$$

$$\theta 2 = \theta 3 - q 3 = \phi - q 3$$

$$\theta 1 = \theta 2 - q 2 = \phi - q 2 - q 3$$

$$\theta 0 = \theta 1 - q 1 = \phi - q 1 - q 2 - q 3$$

$$\theta 4 = \theta 3 + q 4 = \phi + q 4$$

$$\theta 5 = \theta 4 + q 5 = \phi + q 4 + q 5$$

$$\theta 6 = \theta 5 + q 6 = \phi + q 4 + q 5 + q 6$$

【0077】よって、ズレ $\Delta \theta$ は数30の式で表すことができる。

【0078】

【数30】

$$\begin{aligned}\Delta \theta 1 &= \theta 1 - \theta 1 r = \phi - q 2 - q 3 - (0 - q 2 r - q 3 r) \\ &= \phi - \Delta q 2 - \Delta q 3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta \theta 2 &= \theta 2 - \theta 2 r = \phi - q 3 - (0 - q 3 r) \\ &= \phi - \Delta q 3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta \theta 3 &= \theta 3 - \theta 3 r = \phi - 0 \\ &= \phi\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta \theta 4 &= \theta 4 - \theta 4 r = \phi + q 4 - (0 + q 4 r) \\ &= \phi + \Delta q 4\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta \theta 5 &= \theta 5 - \theta 5 r = \phi + q 4 + q 5 - (0 + q 4 r + q 5 r) \\ &= \phi + \Delta q 4 + \Delta q 5\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta \theta 6 &= \theta 6 - \theta 6 r = \phi + q 4 + q 5 + q 6 \\ &\quad - (0 + q 4 r + q 5 r + q 6 r) \\ &= \phi + \Delta q 4 + \Delta q 5 + \Delta q 6\end{aligned}$$

但し、 $\Delta q i = q i - q i r, \quad i = 1, \dots, 6$

【0079】 によって、数30の式は、マトリックス表現
で数31の様に表すことができる。
 $x = E \cdot q$

【0080】
【数31】

但し、

$$\begin{aligned}x &= (\Delta \theta 1, \Delta \theta 2, \dots, \Delta \theta 6, \Delta \dot{\theta} 1, \Delta \dot{\theta} 2, \dots, \Delta \dot{\theta} 6)^t \\ q &= (\phi, \Delta q 2, \dots, \Delta q 6, \dot{\phi}, \Delta \dot{q} 2, \dots, \Delta \dot{q} 6)^t\end{aligned}$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

【0081】 従って、例えば数24の式は数31に示した変換式を用いて数32の様に表すことができる。

【0082】

【数32】

$$u = -(K x \cdot E) \cdot q = -K q \cdot q$$

【0083】 数32の式は、操作量uを胴体部24の傾

斜角と関節角のズレから算出することを示している。ここで、マトリックスEの構成要素を見ると、傾斜角と傾斜角速度の列に1の要素が多いことや、関節角のズレはサーボ系の偏差と等価であり、サーボ系はこの偏差を小さくする様に作用することなどを考えると、操作量uは胴体部24の傾斜角と傾斜角速度のみから簡便に算出す

る数33の式を考えることができる。

【0084】

【数33】

$$u = -K\phi \cdot (\phi, \dot{\phi})^t$$

【0085】図7から図11は実験データであるが、これらから数33で操作量 u を算出した場合でも、この制御系は安定となり、制御系の応答性を決める固有値も数32の式を用いる場合とほとんど変わらないことが確認できた。即ち、図7から図9はロボットを片足支持状態にして支持脚の足首関節角を3度前方にステップ状に変化させたときの各リンク角の応答を示す実験データであり、うち図7は関節角サーボのみの場合を、図8は数33の式による安定化制御の場合を、図9は数32の式による安定化制御の場合を示す。また図10と図11は左右方向に同様に3度傾けた場合の実験データを示しており、うち図10が関節角制御のみの場合を、図11が数32の式による安定化制御の場合を示す。この実験結果から明らかな様に、数32の式による場合と数33の式による場合とで応答に余り差が見られなかった。またいずれの式によるにせよ、この安定化制御を行うことでロボットは転倒することはなかったが、関節角サーボのみの場合には勢い余って転倒することが確認された。

【0086】尚、上記は数27に示す式にも妥当し、同式も全く同様に簡略化することができる。

【0087】以上を前提として、図12から図14のフロー・チャートを参照して制御値の決定を説明する。尚、これらのフロー・チャートは、図15に示す歩行の状態遷移図において、右足から歩行を始めて3歩目から定常歩行に移行し、左足で終わる場合を想定し、それらに沿って経時的に片足支持期、コンプライアンス制御期（遊脚着地時の）、両足支持期とに分けて記載したものである。

【0088】図12は最初の片足支持期の制御値決定フロー・チャートであり、先ずS10において関節角指令値 q_r 、 q_r ドットを読み込む。即ち、ロボット1の制御ユニット26中のROM66には図4に示す様に、歩行パターンとして各リンク角 θ_r （先に述べた様に絶対角）が格納されており、それが経時的に関節角度 q_r と角速度 q_r ドット（共に相対角度）に座標変換され、S10ではその変換された値（時刻 t における）を、12個の関節のうち最初の関節について読み出す。

【0089】次いでS12に進んでその関節について実際の角度 q を入力し、S14に進んで図示の式から関節角サーボ系の操作量を算出する。これは具体的には前記したサーボモータの速度指令値の形で算出される。次いでS16において傾斜角 ψ 、傾斜角速度 $\dot{\psi}$ ドットを入力し、S18において実際角度 q と目標角度 q_r とから関節角偏差 Δq を算出し、S20において数32あるいは数33の式のいずれかを用いて補正量 u を算出する

（尚、数33の式を用いるときはS18はジャンプする）。この補正量 u もサーボモータの速度指令値の形で算出される。続いてS22においてS14で算出した値にS20で算出した値を加算し、その値をサーボアンプに出力する。続いて、S24で遊脚が着地したと判断されるまで、次の関節について同様に制御値を決定し、12の関節について制御値を決定し終わると、次の時刻 $t+1$ について同様の作業を繰り返す。尚、遊脚の着地は前記した着地スイッチ38から検出する。

【0090】尚、ここで留意されるべきことは、S22においてサーボアンプに出力するに際し、関節に優先順位を設けたことである。即ち、関節の優先順位を、支持脚の足関節18、20R(L)、支持足の膝関節16R(L)、支持足の股関節10、12、14R(L)、遊脚の股関節10、12、14L(R)、遊脚の膝関節16L(R)、遊脚の足関節18、20L(R)とし、その順で操作量を加算する様にした。即ち、安定した姿勢の保持に寄与することが大きい関節を優先する様にしたものであり、この結果、時間的に余裕がないときには、例えば、支持脚の足関節と膝関節についてのみ操作量 u を加算することになる。言うまでもなく、時間的に余裕があるときは、この順序で全ての関節に加算する。

【0091】図12フロー・チャートのS24で遊脚着地と判断されるときは図13フロー・チャートに従って着地時のコンプライアンス制御に移行する。同図を参照して説明すると、先ずS100からS104において同様にサーボ制御値を算出した後、S106に進んで前記した6軸力センサ36の出力から着地した遊脚に加わった足首トルクを入力し、S108でコンプライアンス量 m を算出する。これはインピーダンス制御を速度分解制御で実現した、いわゆる仮想的なコンプライアンス制御手法を用いて行う。続いてS110においてサーボ制御値 v_c と仮想コンプライアンス制御値 m と補正量 u とを加算した値をサーボアンプに出力し、S112でコンプライアンス制御が終了と判断されるまで、それぞれの関節について経時的に繰り返す。尚、この終了判断は、着地から所定時間が経過したか否かで判断する。またS110の補正量 u の値は、図12フロー・チャートのS20で算出した値を保存しておいて使用する。

【0092】図13フロー・チャートにおいてS112でコンプライアンス制御終了と判断されたときは図14フロー・チャートのS200からS214に従って両脚支持期の制御値を決定するが、これはS210の補正量 U の算出が数20の式から決定される点を除けば、図12フロー・チャートと同様である。尚、ここで数20に示した式を用いて精緻に操作量を算出する様にしたが、 ΔF を外乱と考えれば数32または数33から算出しても良く、逆に遊脚に外力が作用するときは、図12フロー・チャートのS20において数20を含めた式の中から算出しても良い。

【0093】尚、ここで前述した評価関数Jの重みの決定について付言すると、先に数23に示した式の評価関数Jを前後方向の運動の場合に具体的に表すと、一般的

には数34の様になる。

【0094】

【数34】

$$J = \int_0^{\infty} (q_1 \cdot \Delta \theta_1^2 + q_2 \cdot \Delta \theta_2^2 + q_3 \cdot \Delta \theta_3^2 + q_4 \cdot \Delta \theta_4^2 + q_5 \cdot \Delta \theta_5^2 + q_6 \cdot \Delta \theta_6^2 + r_1 \cdot u_1^2 + r_2 \cdot u_2^2 + r_3 \cdot u_3^2 + r_4 \cdot u_4^2 + r_5 \cdot u_5^2 + r_6 \cdot u_6^2) dt$$

【0095】この評価関数Jは姿勢のズレ $\Delta \theta_i$ と操作量 u_i の重み付き自乗和を表している。最適レギュレータ理論によれば、重みの大きい項の姿勢のズレは重みの小さい項のそれよりも小さい値になる様にフィードバックゲインが算出される。よって、重みの付けかたで違ったフィードバックゲインが算出され、姿勢のズレの修正の時間応答が相違してくる。最適レギュレータ理論では、この重みの付けかたに関する定まった選定法がない。一般にはシミュレーションや実験により選定する。

【0096】そこで、この発明においては2足歩行の特徴を考慮して重みQ, Rを選定する様にした。それに関して階段を昇降するときの様に遊脚の着地位置を正確に制御したい場合を例にとりて説明する。

【0097】図16に示す様に、遊脚の目標足先位置(x, y)にズレ Δx , Δy が生じた場合を考える。これらは数35から数38の様に示すことができる。

【0098】

【数35】

$$x = l_1 \cdot \sin \theta_1 + l_2 \cdot \sin \theta_2 + l_4 \cdot \sin \theta_4 + l_5 \cdot \sin \theta_5 + l_6 \cdot \sin \theta_6$$

【0099】

【数36】

$$y = l_1 \cdot \cos \theta_1 + l_2 \cdot \cos \theta_2 + l_4 \cdot \cos \theta_4 + l_5 \cdot \cos \theta_5 + l_6 \cdot \cos \theta_6$$

【0100】

【数37】

$$\Delta x = l_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \Delta \theta_1 + l_2 \cdot \cos \theta_2 \cdot \Delta \theta_2 + l_4 \cdot \cos \theta_4 \cdot \Delta \theta_4 + l_5 \cdot \cos \theta_5 \cdot \Delta \theta_5 + l_6 \cdot \cos \theta_6 \cdot \Delta \theta_6$$

【0101】

【数38】

$$\Delta y = -l_1 \cdot \sin \theta_1 \cdot \Delta \theta_1 - l_2 \cdot \sin \theta_2 \cdot \Delta \theta_2 - l_4 \cdot \sin \theta_4 \cdot \Delta \theta_4 - l_5 \cdot \sin \theta_5 \cdot \Delta \theta_5 - l_6 \cdot \sin \theta_6 \cdot \Delta \theta_6$$

【0102】図16に示す様に、遊脚の目標足先位置(x, y)からのズレ Δx , Δy の位置上のズレ Δp は、数39の様に自乗和で表すことができる。

【0103】

【数39】

$$\begin{aligned}
\Delta p^2 &= \Delta x^2 + \Delta y^2 \\
&\leq ((l_1 \cdot \sin \theta_1)^2 + (l_1 \cdot \cos \theta_1)^2) \cdot \Delta \theta_1^2 \\
&\quad + ((l_2 \cdot \sin \theta_2)^2 + (l_2 \cdot \cos \theta_2)^2) \cdot \Delta \theta_2^2 \\
&\quad + ((l_4 \cdot \sin \theta_4)^2 + (l_2 \cdot \cos \theta_4)^2) \cdot \Delta \theta_4^2 \\
&\quad + ((l_5 \cdot \sin \theta_5)^2 + (l_2 \cdot \cos \theta_5)^2) \cdot \Delta \theta_5^2 \\
&\quad + ((l_6 \cdot \sin \theta_6)^2 + (l_2 \cdot \cos \theta_6)^2) \cdot \Delta \theta_6^2 \\
&= a_1 \cdot \Delta \theta_1^2 + a_2 \cdot \Delta \theta_2^2 + a_4 \cdot \Delta \theta_4^2 \\
&\quad + a_5 \cdot \Delta \theta_5^2 + a_6 \cdot \Delta \theta_6^2
\end{aligned}$$

【0104】この式から明らかな様に、目標足先位置からのズレ Δp^2 は、各リンクの姿勢ズレ $\Delta \theta_i$ にかかる係数に比例している。即ち、その係数が大きい順に姿勢ズレ $\Delta \theta_i$ を小さくすれば、位置ズレ Δp^2 を効率的に小さくすることができる。一方、評価関数 J は重みの大きい姿勢ズレ $\Delta \theta_i$ ほど小さくすることができる。よって、評価関数 J を数40の式の様に選ぶことによって最適に足先位置のズレを修正することができる。即ち、所定の位置に正確に着地させたいときなどは、全てのリンク角についての重みを等しくするのではなく、足先位置のズレに対する寄与度に応じて重みを変えることとする。例えば、数34において、 $\Delta \theta_1$ の変動を小さくし

たいときは重み q_1 を大きくし、アクチュエータの最大発生トルクを考慮し、 u_2 の発生トルクを大きくしたいときは r_2 を小さくすれば良い。この様に、安定化制御とは別に、重み Q, R の大きさを最適に制御したい位置（ここでは関節角度位置などの関節座標系での位置ではない、作業座標系での位置）に応じて変えることにより、例えば足先の位置を最適（効果的）に制御することが可能となる。尚、この選定手法は、足先位置のみならず、重心位置など他の部位の位置にも適用可能である。

【0105】
【数40】

$$\begin{aligned}
J &= \int_0^{\infty} (q_7 \cdot \Delta p^2 + q_3 \cdot \Delta \theta_3^2 + r_1 \cdot u_1^2 + r_2 \cdot u_2^2 \\
&\quad + r_3 \cdot u_3^2 + r_4 \cdot u_4^2 + r_5 \cdot u_5^2 + r_6 \cdot u_6^2) dt \\
&= \int_0^{\infty} (k \cdot (a_1 \cdot \Delta \theta_1^2 + a_2 \cdot \Delta \theta_2^2 + a_4 \cdot \Delta \theta_4^2 \\
&\quad + a_5 \cdot \Delta \theta_5^2 + a_6 \cdot \Delta \theta_6^2) + q_3 \cdot \Delta \theta_3^2 \\
&\quad + r_1 \cdot u_1^2 + r_2 \cdot u_2^2 + r_3 \cdot u_3^2 + r_4 \cdot u_4^2 \\
&\quad + r_5 \cdot u_5^2 + r_6 \cdot u_6^2) dt
\end{aligned}$$

【0106】この実施例は上記の如く、関節角サーボ系を備えた2足歩行の脚式移動ロボットの制御装置において、予め設定した歩行パターンの目標角度と実際の角度との偏差を絶対角度で求め、それに応じて操作量 u を求めてサーボ操作量に足し込む様に構成したので、歩行パターンが予期しない凹凸路面を歩行するときも常に安定した姿勢を保持することができ、また線形性を損なう様な歩行パターンに対しても高速なコンピュータを用いて非線形補償する必要がなく、常に滑らかな歩行を実現することができる。また操作量 u の算出に際しても、遊脚に作用する外力の変動分に応じて精緻に決定する手法に加えて、胴体部の傾斜角度と傾斜角速度とから簡便に算出する様にも構成したので、その簡便に算出する手法によるときは簡易に算出することができる。

【0107】図17は本発明の第2実施例を示すブロック図であり、第1実施例の図4と同様に安定化制御系を表すものである。この例は、前記したゲイン K_x 、あるいは K_q, K_ψ に周波数特性を持たせたものである。即ち、第1実施例においては、図18に示す様に、ゲインを周波数に対しては一定値に固定したのに対し、図19に示す如く、周波数に応じて低減する様に構成した。

【0108】これについて説明すると、外乱が生じたときに備え、ゲインを上げておいて系の反応を早め、外乱に対する安定性を向上させる必要がある。しかし、ゲインを大きくしてリンクの応答性を上げると、高周波の振動が各リンクに生じ、更にゲインを上げていくと、その高周波の振動がフィードバックループ内で増幅され、発振を生じてしまう。これは、前記した数1の式で表され

る数学モデルは剛性モデルの様な低周波領域でのみ成立するものであり、リンクの柔らかさ、ガタ、撓み等の影響が現れる高周波領域の状態を正確に表現し得ていないためである。しかしながら、高周波領域まで含めた状態を正確に数学モデルで表現するのは極めて困難であり、仮に表現できたとしても非常に複雑なモデルとなり、大容量で高価なコンピュータが必要となって実現が殆ど不可能となる。

【0109】この発振の原因は高周波信号が減衰せず、増幅することによるものであるから、この高周波信号が減衰させれば良い。そこで、本実施例においてはフィードバックゲイン K_x 、あるいは K_q 、 K_ψ に周波数特性を持たせる如く構成した。即ち、図19に示した様に、指令信号レベルの低周波領域では比較的ゲインを高くし、リンクが弾性を示す高周波領域では低くする様にした。具体的には図17に示す様に、フィードバックループ内に高周波遮断のフィルタを介挿する様にした。このフィルタの状態方程式は数41の式で表すことができ、 A_f 、 B_f 、 C_f を設計段階において適宜設定することによりカットオフ周波数を任意に決定することができる。

【0110】

【数41】

$$\dot{z} = A_f \cdot z + B_f \cdot v$$

$$u = C_f \cdot z$$

ここで、 z ：フィルタの状態変数

【0111】本実施例の場合、図12フロー・チャートのS20、図14フロー・チャートのS210での補正量 u 、 U の算出に当たり、運搬重量に応じカットオフ周波数を可変とする。即ち、ロボットが物体を上体に取り付けて運搬するときはロボットのメカニズムの固有周波数が変化し、よって発振周波数も変化するからである。尚、この調節はソフトウェア手法に依らずに、電気フィルタを用いても良いことは言うまでもない。

【0112】本実施例は安定化制御系（最適レギュレータ）のフィードバックゲインを高周波域において小さく設定する様に構成し、予め設定した歩行パターンの目標角度と実際の角度との偏差を絶対角度で求め、それに応じて求めた操作量 u を足し込む様に構成したので、関節リンクの弾性による発振が生じない限度において、フィルタを付加しない場合より安定性を一層良く実現することができるに加えて、歩行パターンが予期しない凹凸路面を歩行するときも常に安定した姿勢を保持することができ、また線形性を損なう様な歩行パターンに対しても高速なコンピュータを用いて非線形補償する必要がなく、常に滑らかな歩行を実現することができる。また操作量 u の算出に際しても、遊脚に作用する外力の変動分に依りて精緻に決定する手法に加えて、胴体部の傾斜

角度と傾斜角速度とから簡便に算出する様にも構成したので、その簡便に算出する手法による場合は簡易に算出することができる。

【0113】尚、上記した第1、第2実施例にあっては、図3において符号（イ）で示す個所に操作量 u を加算する様にしたが、同図に符号（ロ）あるいは（ハ）に示す個所で加算しても良い。

【0114】更には、図4に示した様に、歩行パターンを絶対角度で設計することとしたが、それに限られるものではなく、相対角度で設計しても良い。但し、その場合に実際の角度は絶対角度で検出されることから、適宜に座標変換して絶対角度を求める必要がある。

【0115】更には、この発明を2足歩行の脚式移動ロボットについて説明したが、それに限られるものではなく、1足ないしは3足以上の脚式移動ロボットにも妥当するものである。

【0116】

【発明の効果】請求項1項にあっては、脚式移動ロボットの脚部リンクの各関節に配したサーボモータに所定の操作量を与え、各関節の角度を予め設定した目標角度に追従制御する制御装置において、前記脚部リンクの実角度と目標角度との偏差を重力方向に対する絶対角度で検出する検出手段、及び検出した偏差に応じ、それを補正すべく第2の操作量を演算する演算手段とを備え、前記制御装置は、前記所定の操作量に演算された第2の操作量を加算して前記サーボモータに与える様に構成したので、予期せぬ凹凸がある路面を歩行するときも安定した姿勢を常に保持することができ、また平坦路を歩行するときも含めて常に滑らかな姿勢制御を実現することができる。

【0117】請求項2項の装置にあっては、前記脚式移動ロボットが、基体と、それに連結される複数本の脚部リンクとからなるものにおいて、前記演算手段は、該基体の傾斜角及び／又は傾斜角速度から前記第2の操作量を演算する様に構成したので、簡易に第2の操作量を演算することができる。

【0118】請求項3項の装置にあっては、前記脚式移動ロボットが、基体と、それに第1の関節を介して連結される2本の脚部リンクとからなり、該脚部リンクがその先端付近に第2の関節を備えると共に、該第2の関節と前記第1の関節との間に第3の関節を備え、該2本の脚部リンクで交互に自重を支持しつつ歩行する2足歩行型のロボットであり、前記制御装置は、支持脚の第2関節、支持脚の第3関節、支持脚の第1関節、遊脚の第1関節、遊脚の第3関節、遊脚の第2関節の順に設けられた優先順位に少なくとも部分的に従って、前記所定の操作量に第2の操作量を加算する様に構成したので、制御に時間的な余裕がないときにおいても、有効に安定化制御を実現することができる。

【0119】請求項4項の装置にあっては、前記演算手

段は前記第2の操作量を状態方程式を用いて演算すると共に、その状態フィードバックゲインを前記角度から決定されるロボットの姿勢に応じて変える様に構成したので、安定化制御に加えて、着地位置などを最適制御することができる。

【0120】請求項5項の装置にあっては、前記脚式移動ロボットが、基体と、それに第1の関節を介して連結され、その先端付近に第2の関節を備えた2本の脚部リンクとからなり、該2本の脚部リンクで交互に自重を支持しつつ歩行する2足歩行型のロボットであり、該第2関節付近に遊脚に作用する外力を検出する手段を備え、前記演算手段は、検出された外力に基づいて前記第2の操作量を演算する様に構成したので、第2の操作量を精緻に演算することができ、よって一層安定した姿勢を常年实现することができる。

【0121】請求項6項の装置にあっては、フィードバック・ゲインに周波数特性を与える様に構成したので、前記した効果に加えて、発振を抑止しつつ安定した高速歩行を実現することができる。

【0122】請求項7項の装置にあっては、カットオフ周波数を可搬重量に応じて可変に構成したので、前記した効果に加えて、発振を抑制しつつ安定した高速歩行を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明に係る脚式移動ロボットの制御装置を全体的に示す概略図である。

【図2】図1に示す制御ユニットの説明ブロック図である。

【図3】図2に示す制御ユニットの制御のうちの関節角サーボ系を示すブロック線図である。

【図4】図3に示す関節角サーボ系に、この発明で算出する第2の操作量を加算する状態を示すブロック図である。

【図5】図1に示すロボットの前後方向の運動を示す説明図である。

【図6】図1に示すロボットの左右方向の運動を示す説明図である。

【図7】図3に示す関節角サーボ系のみを備えた場合に、ロボットの支持脚の足首関節角を前後方向にステップ状に3度傾けたときの応答性を示す実験データ図である。

【図8】図4に示す第2の操作量を加算した場合の図7

と同様の実験データ図である。

【図9】図8と同様のものであって、別の手法で算出した第2の操作量を加算した場合の実験データ図である。

【図10】図7と同様のものであって、ロボットの支持脚の足首関節角を左右方向にステップ状に3度傾けたときの応答性を示す実験データ図である。

【図11】図10と同様のものであって、図4に示す第2の操作量を加算した場合の実験データ図である。

【図12】図2の制御装置の動作を示すフロー・チャートであって、片足支持期の制御値決定を示すフロー・チャートである。

【図13】図12と同様のものであって、着地時のコンプライアンス制御期の制御値決定を示すフロー・チャートである。

【図14】図12と同様のものであって、両足支持期の制御値決定を示すフロー・チャートである。

【図15】図12から図14に示した制御時期を説明する歩行の状態遷移図である。

【図16】図4に示す第2の操作量を算出するときの評価関数の重みの決定手法を説明する説明図である。

【図17】本発明の第2実施例を示す図4と同様の説明ブロック線図である。

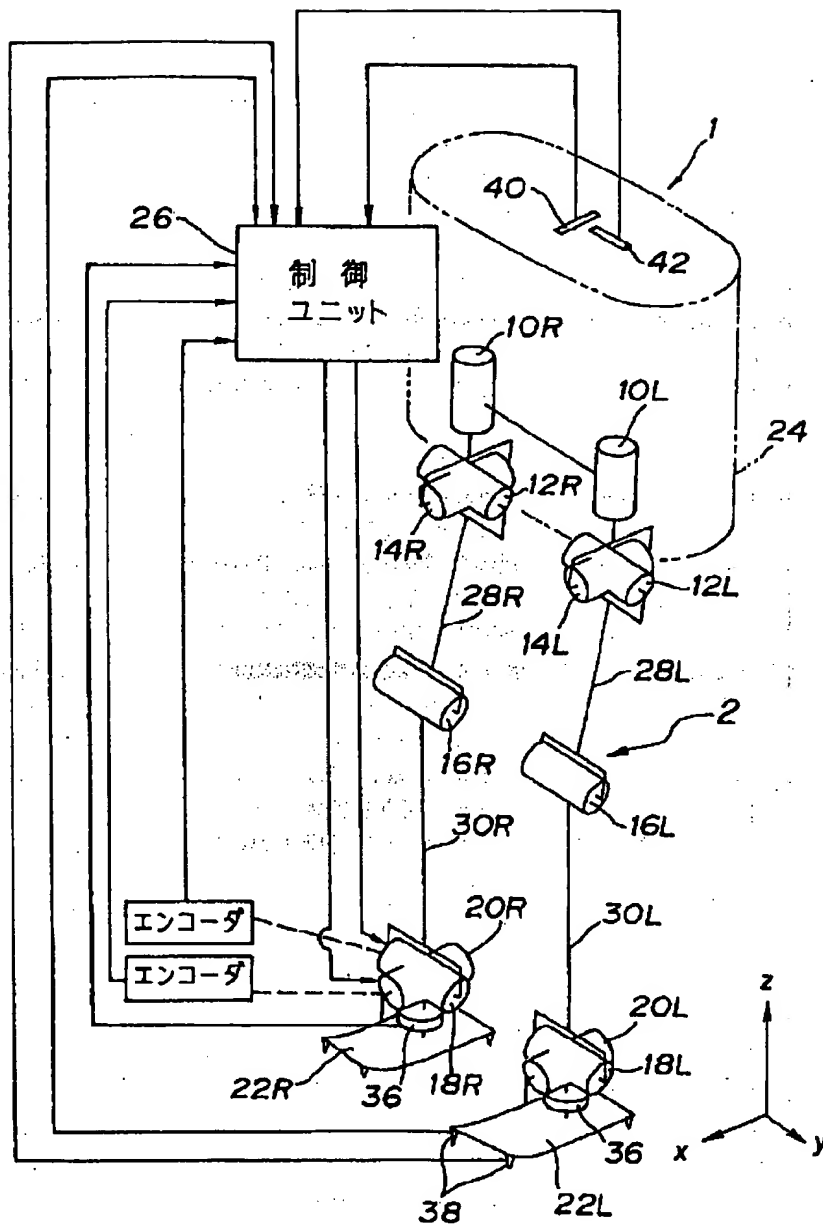
【図18】第1実施例のフィードバックゲインの周波数特性を示す説明特性図である。

【図19】第2実施例のフィードバックゲインの周波数特性を示す説明特性図である。

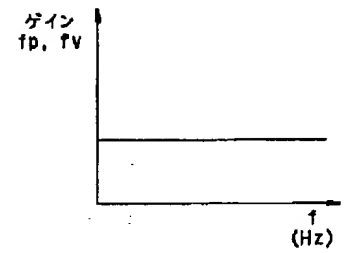
【符号の説明】

1	脚式移動ロボット（2足歩行ロボット）
2	脚部リンク
10R, 10L	脚部回旋用の関節（軸）
12R, 12L	股部のピッチ方向の関節（軸）
14R, 14L	股部のロール方向の関節（軸）
16R, 16L	膝部のピッチ方向の関節（軸）
18R, 18L	足首部のピッチ方向の関節（軸）
20R, 20L	足首部のロール方向の関節（軸）
22R, 22L	足平（足部）
24	胴体部
26	制御ユニット
36	6軸力センサ
40, 42	傾斜センサ

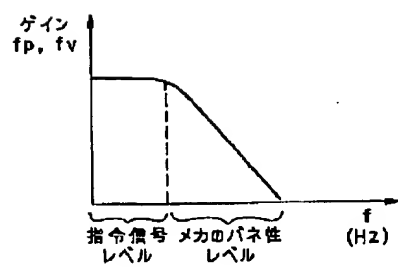
【図1】



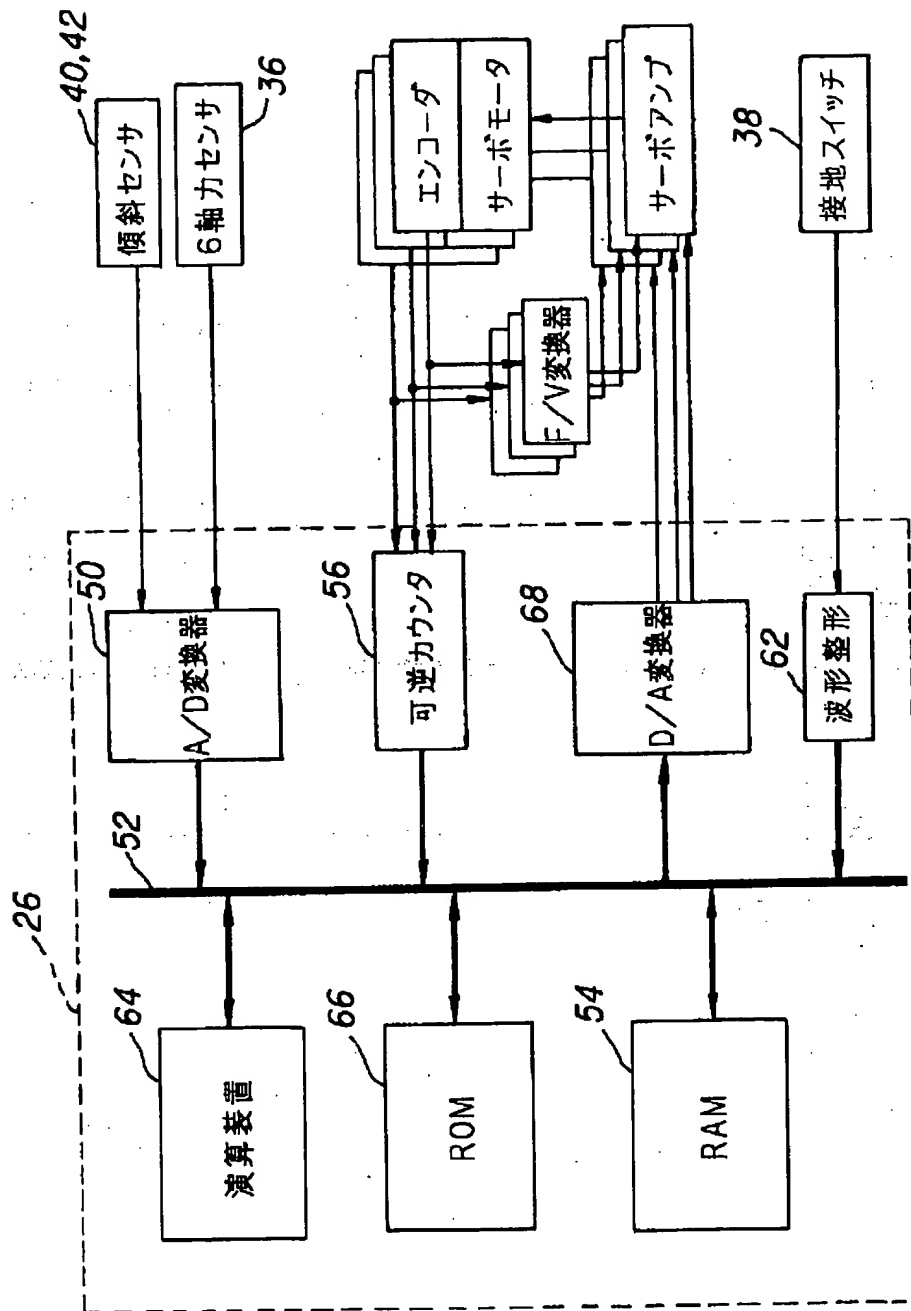
【図18】



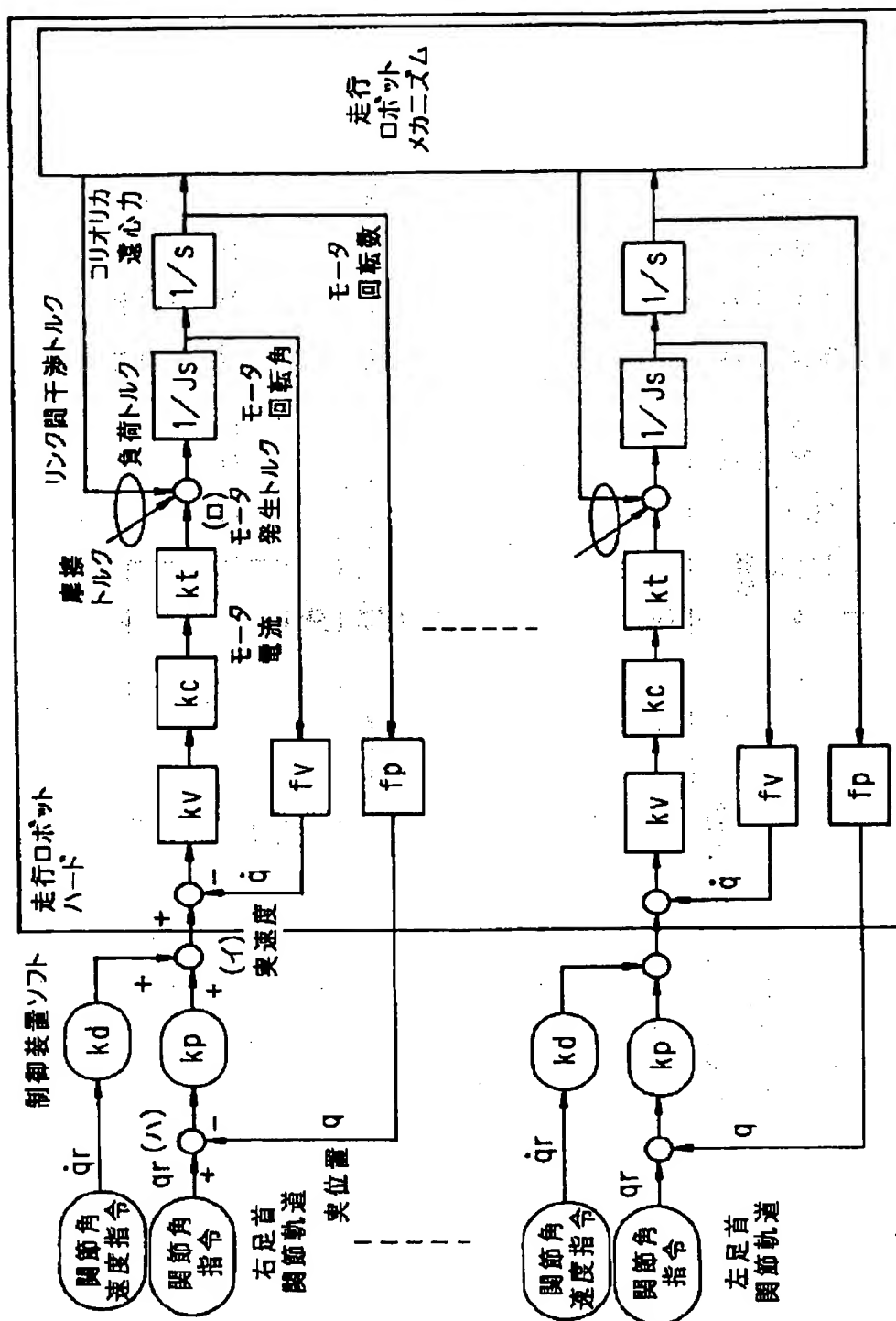
【図19】



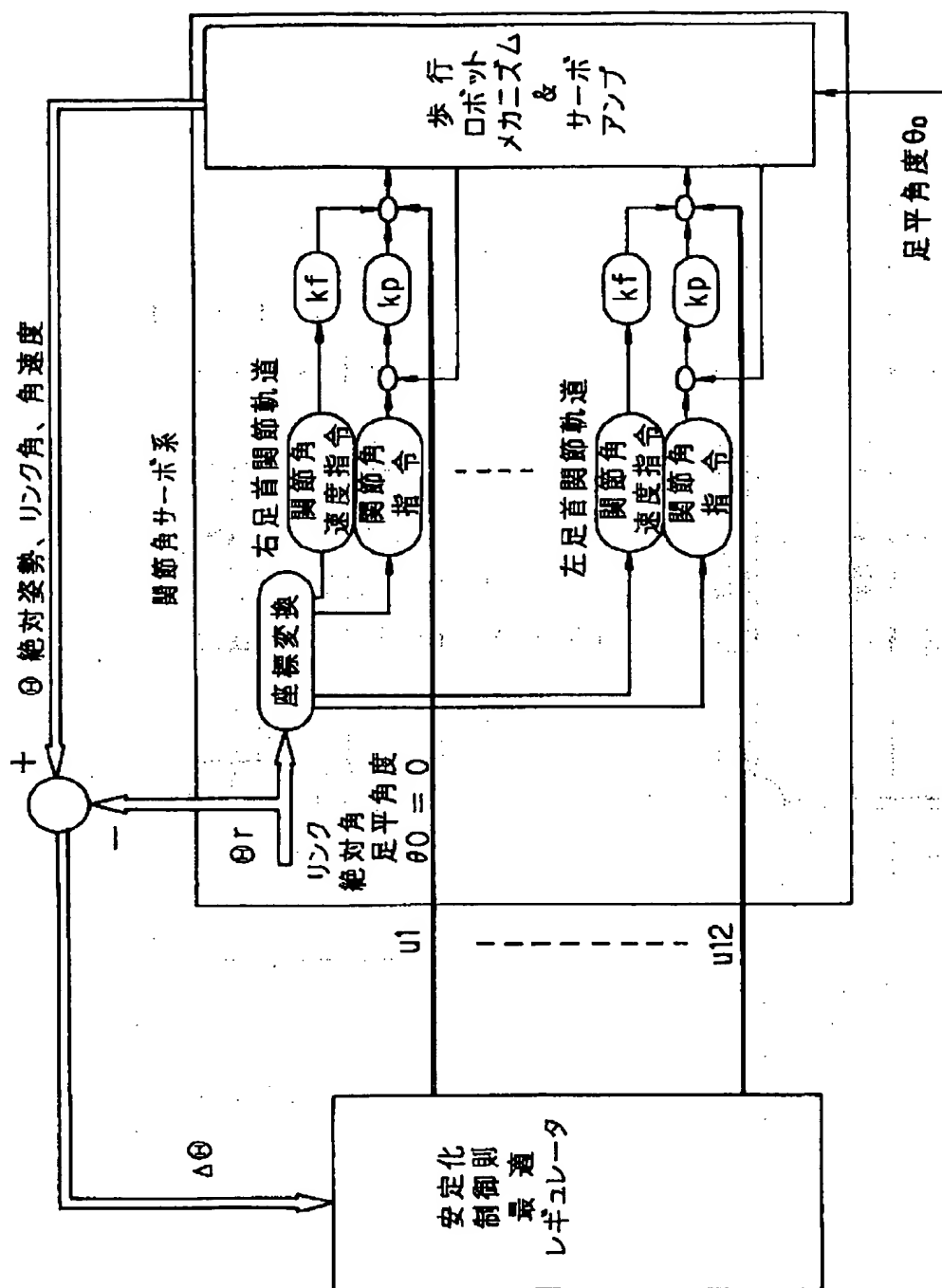
【図2】



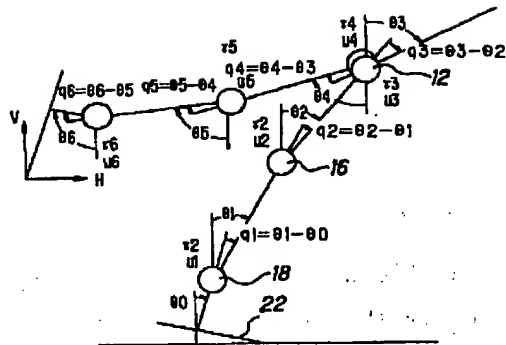
【図3】



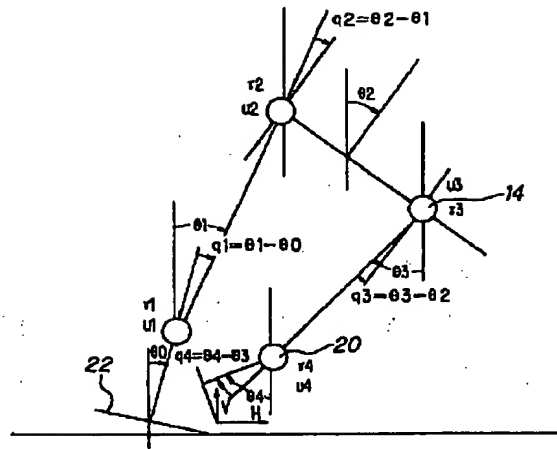
【図4】



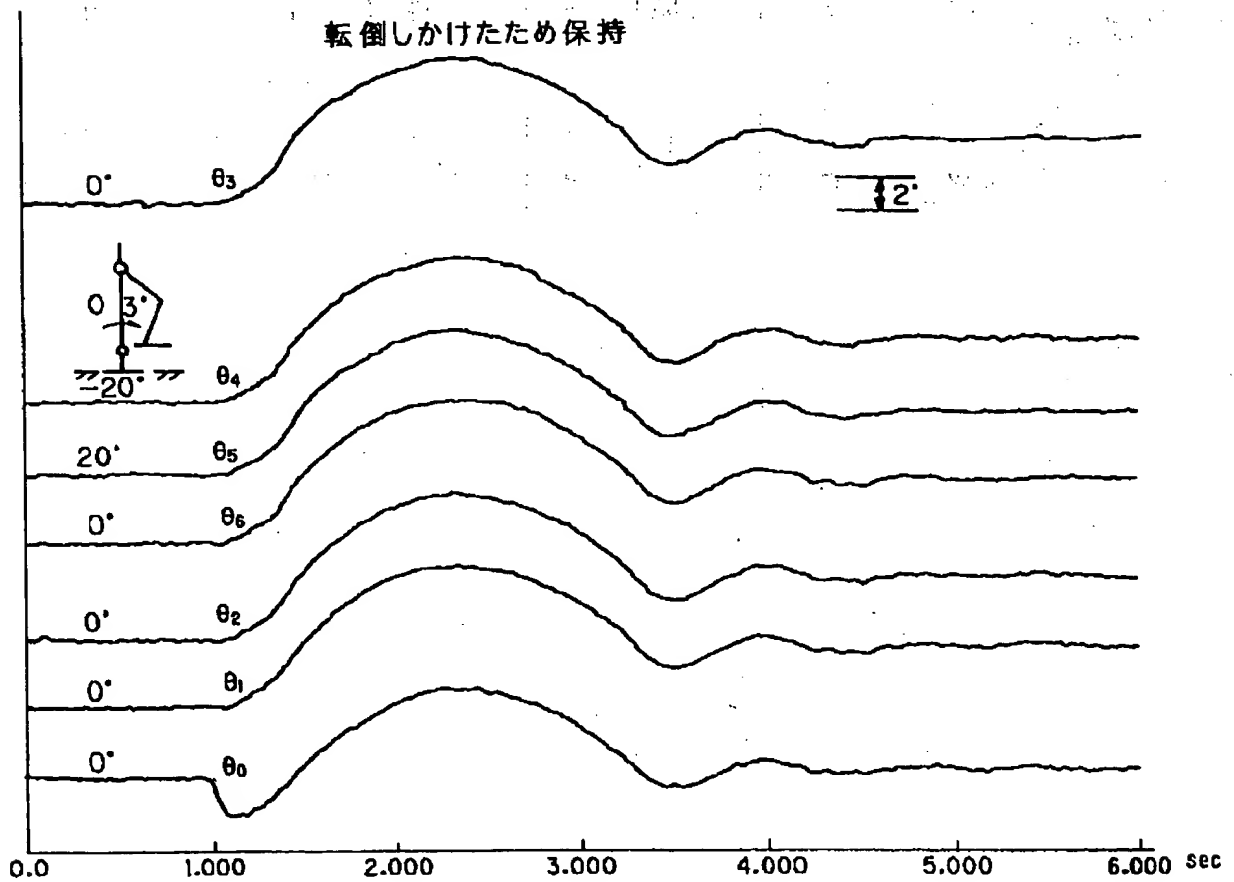
【図5】



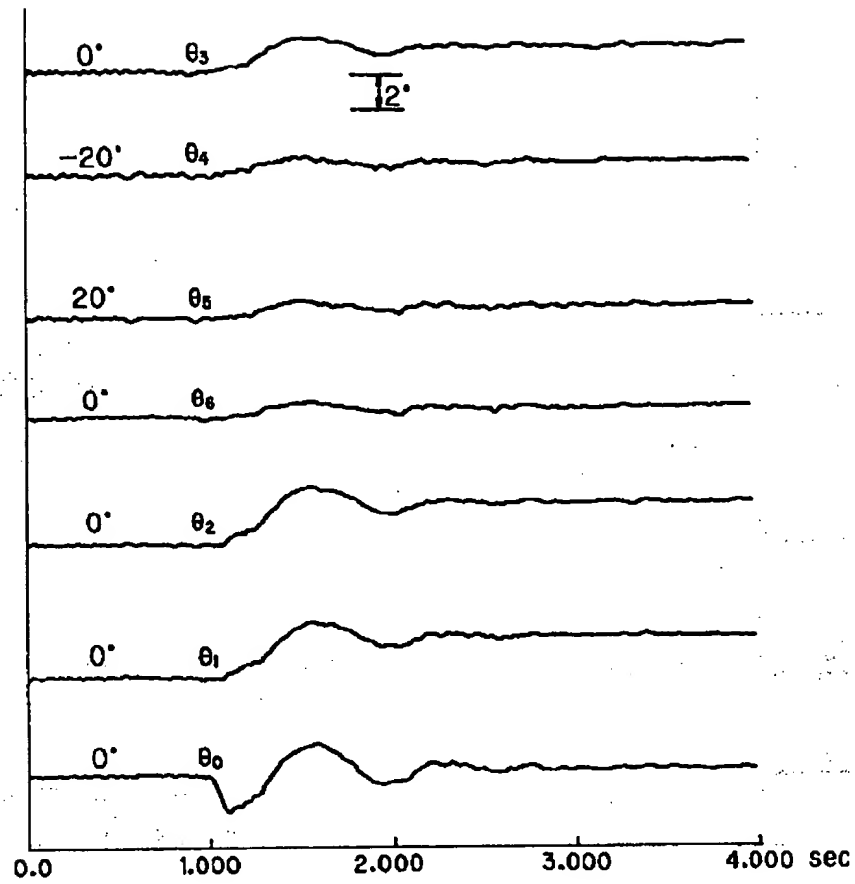
【図6】



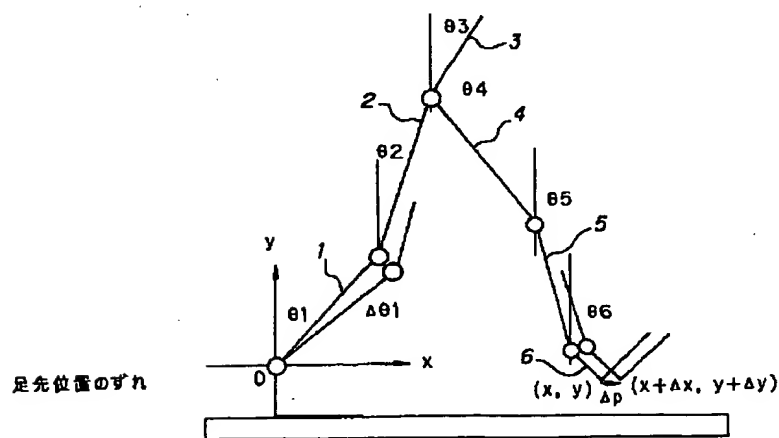
【図7】



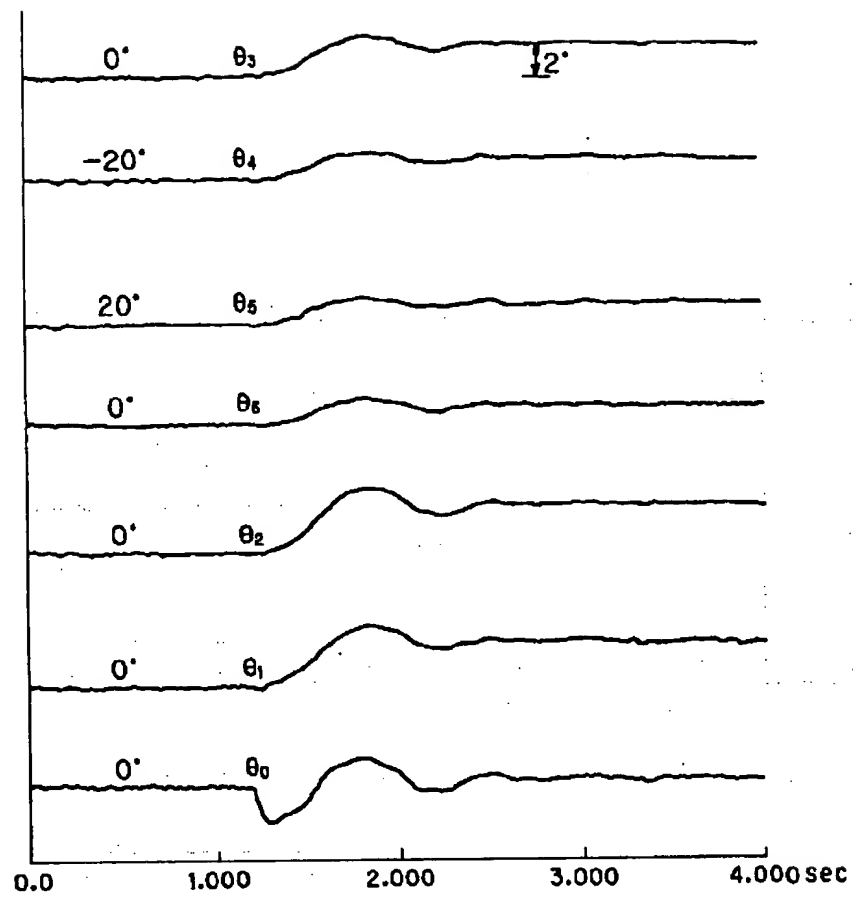
【図8】



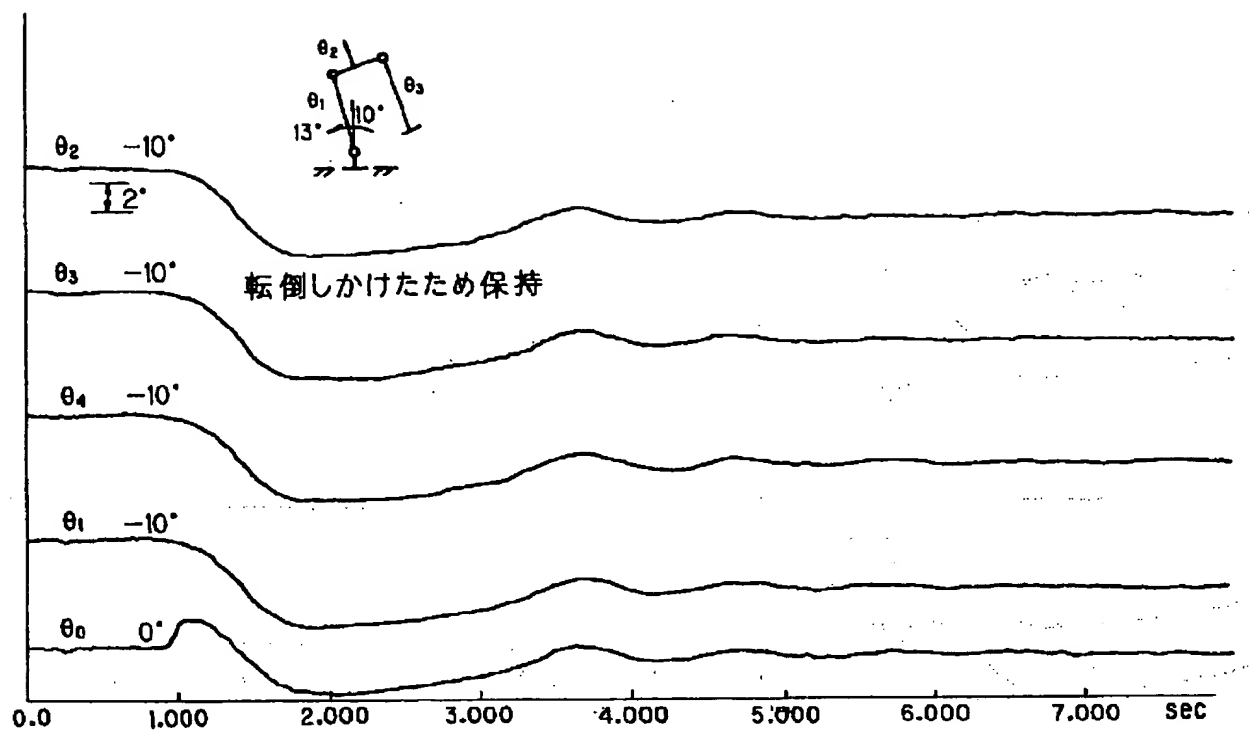
【図16】



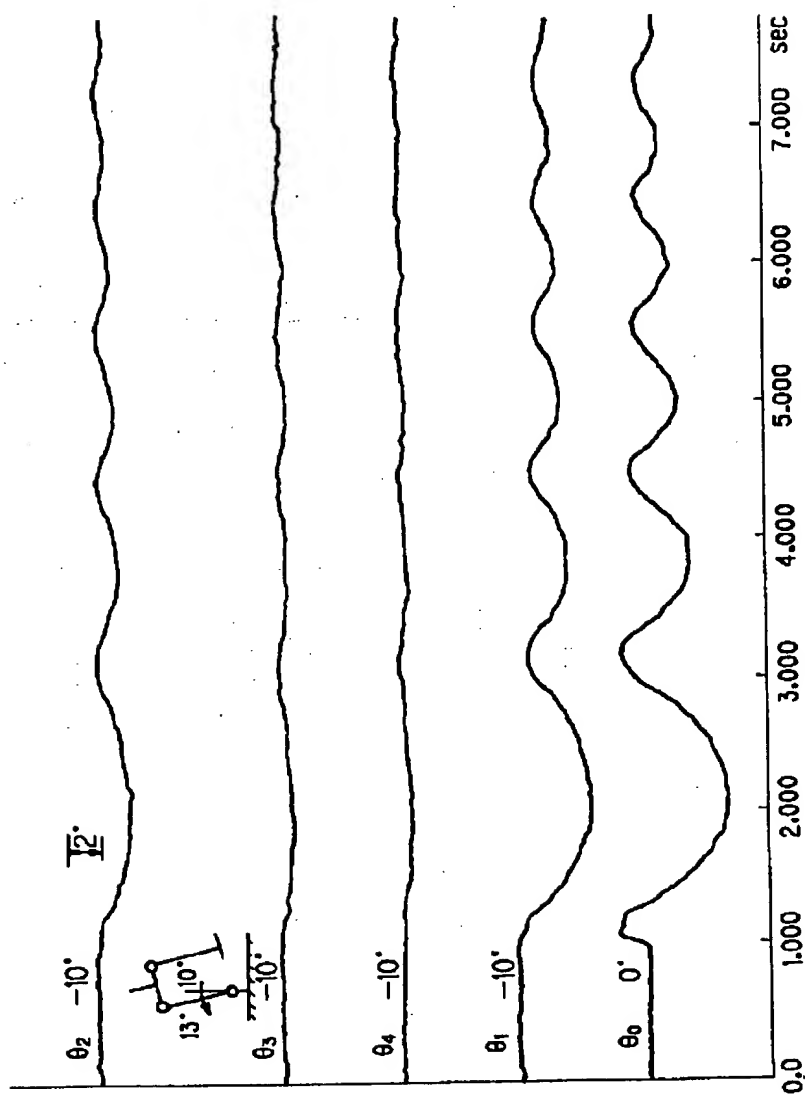
【図9】



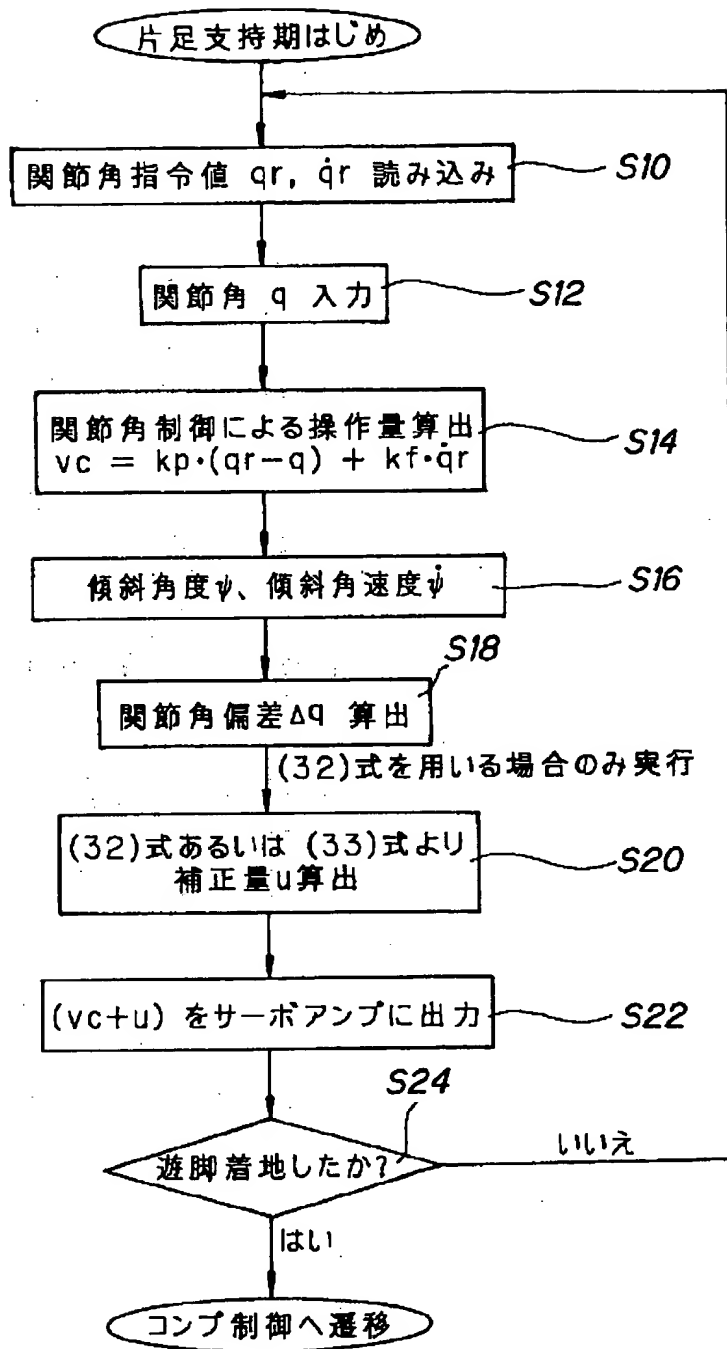
【図10】



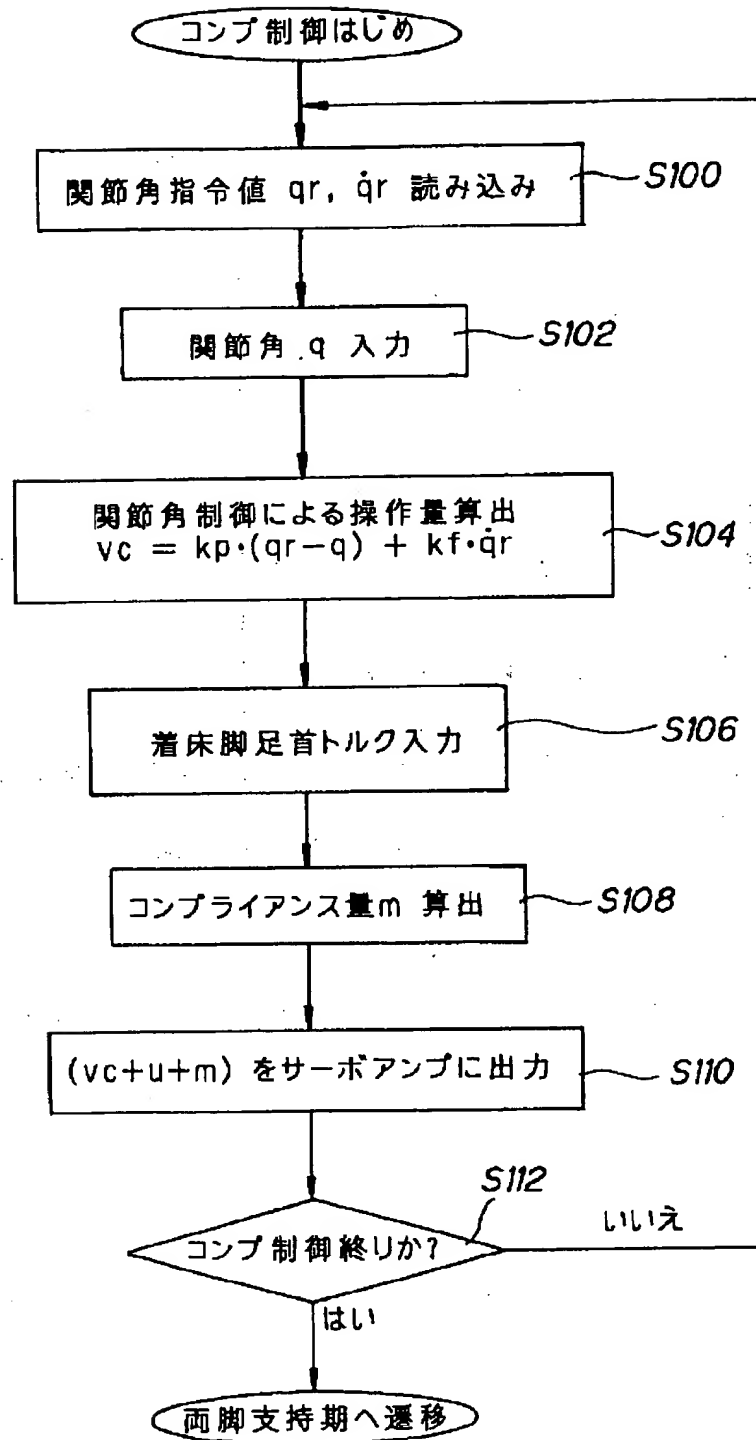
【図11】



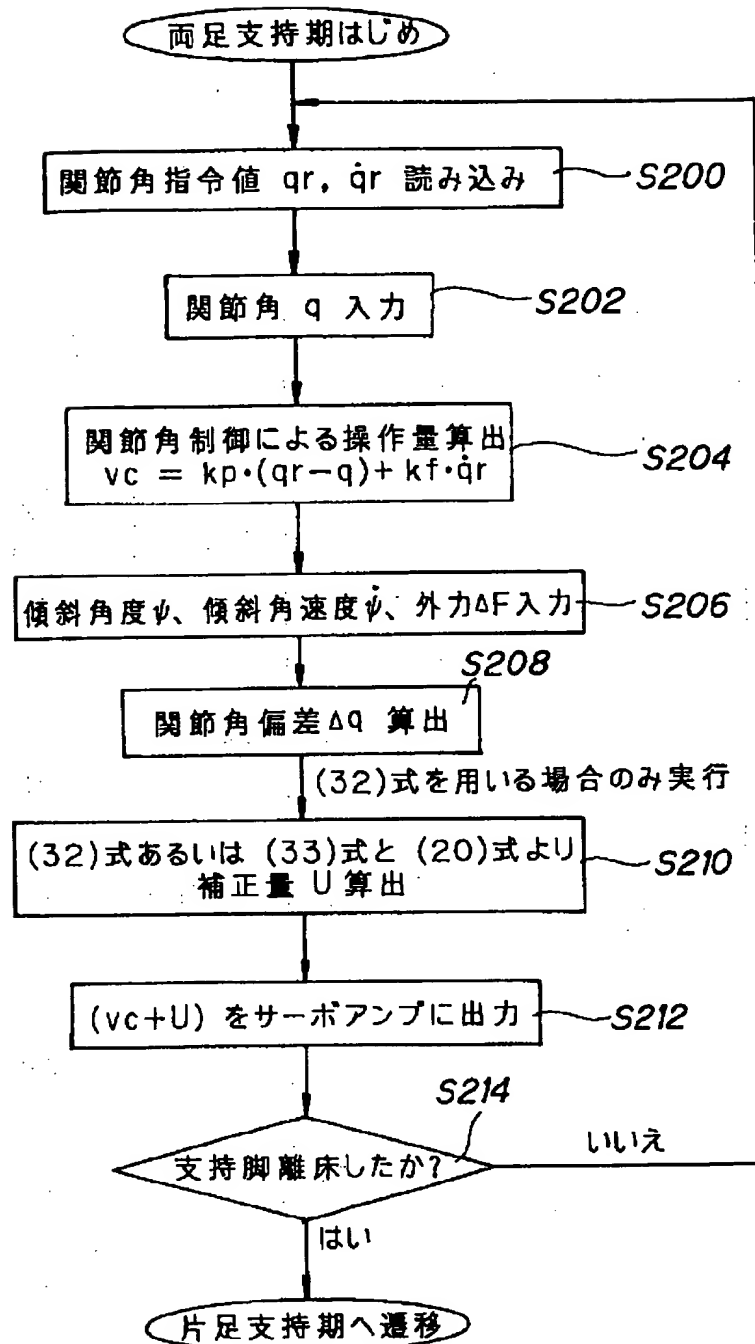
【図12】



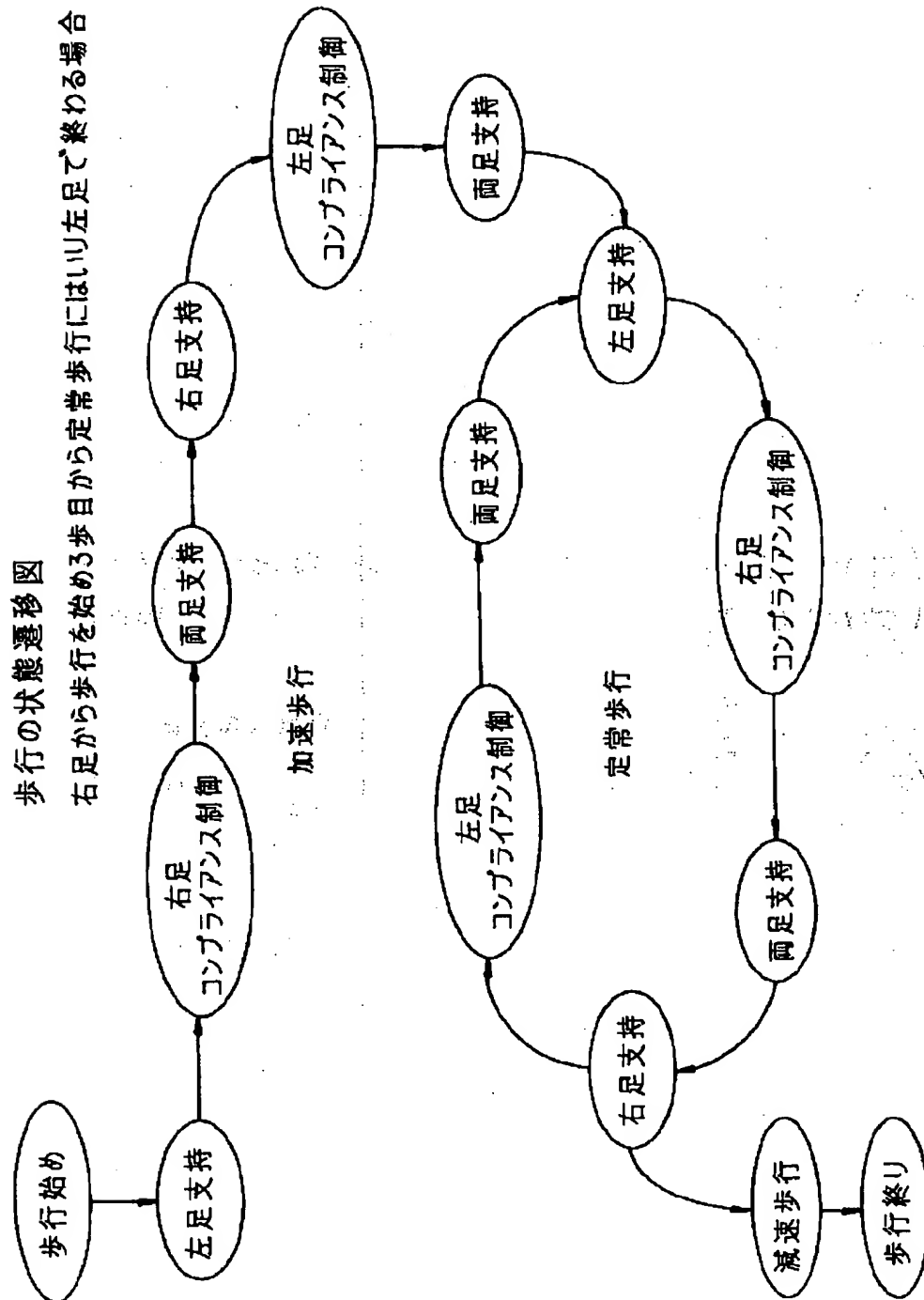
【図13】



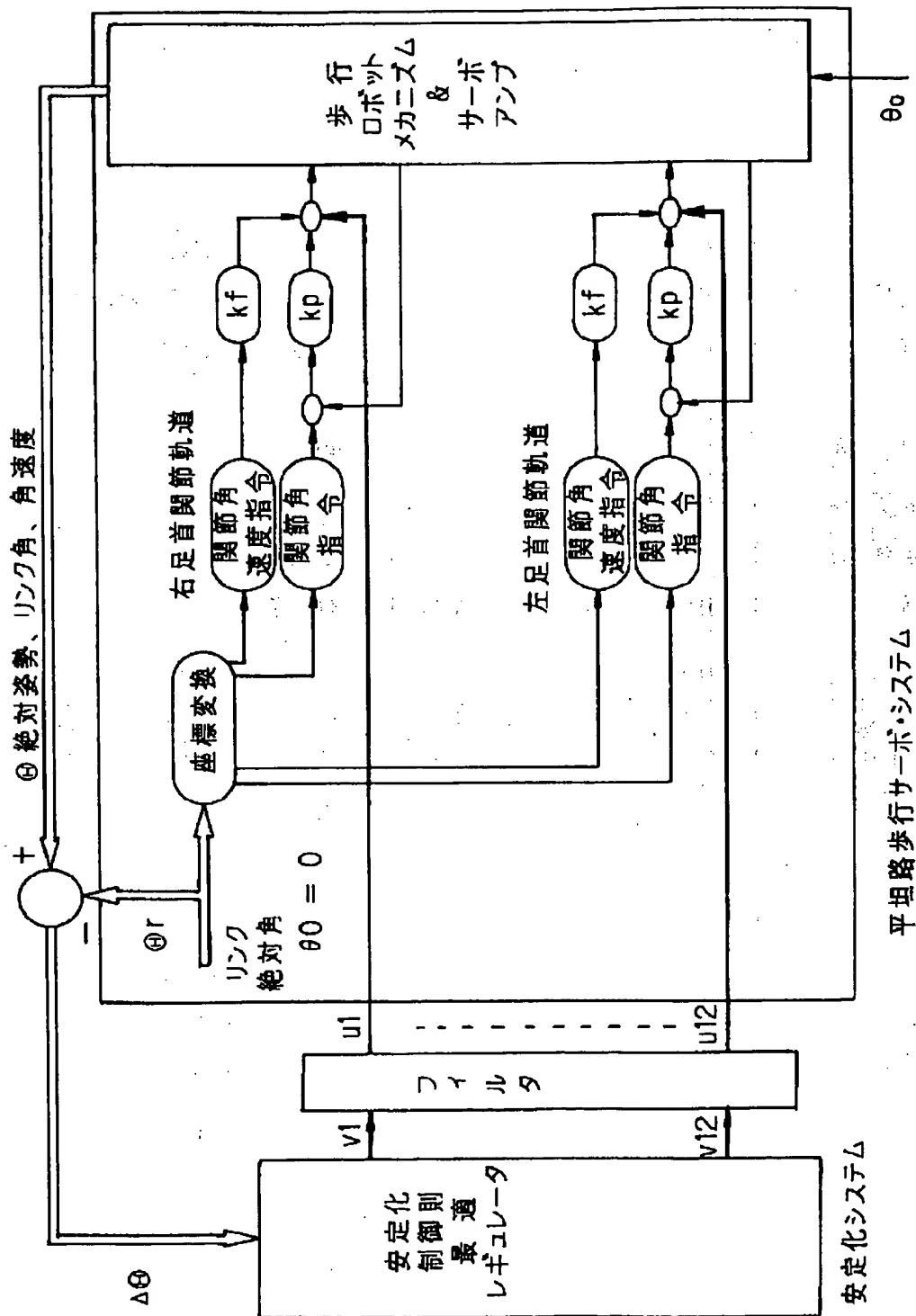
【図14】



【図15】



【図17】



This Page Blank (uspto)